

OMAR EMIR ALVAREZ

**MÉTODO PARA ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS DE PROJETO PARA
MANTENABILIDADE – DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE
MANTENABILIDADE EM PROJETO DE PRODUTOS/ SISTEMAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia”, Especialidade em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Osmar Possamai, Dr.



03414954



Florianópolis, Novembro de 2001

OMAR EMIR ALVAREZ

**MÉTODO PARA ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS DE PROJETO PARA
MANTENABILIDADE – DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE
MANTENABILIDADE EM PROJETO DE PRODUTOS/ SISTEMAS**

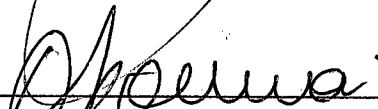
Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia”,
Especialidade em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 29 de Novembro de 2001



Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.
Coordenador do curso

Banca Examinadora:




Prof. Osmar Possamai, Dr.
Orientador



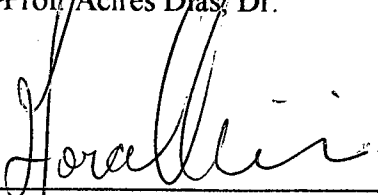
Ana Lucia Miranda Lopes, Dra.
Moderadora



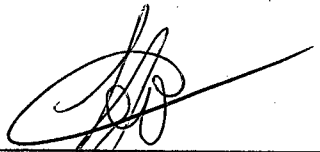
Prof. Acires Dias, Dr.



Prof. Celso Luiz Pereira Rodrigues, Dr. - UFPB



Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.



Prof. Luiz Veridiano Oliveira Dalla Valentina, Dr

DEDICATÓRIA

Dedico meu trabalho a todas as pessoas que influenciaram minha formação ética, moral, profissional, cultural e social;

Contribuíram para a escolha de objetivos, rumos e metas;

Com incentivos para perseverar e atingi-los;

Com parcerias nas jornadas da vida;

A todos eles, anônimos que são muitos, expresso minha gratidão por terem contribuído direta ou indiretamente para alcançar mais uma conquista.

AGRADECIMENTO

Agradeço:

Ao Professor Celso L. P. Rodrigues por me estimular para o ingresso ao curso de Doutorado;

Ao Departamento de Engenharia de Produção por viabilizar a realização do meu Doutorado;

Ao Professor Osmar Possamai por orientar este trabalho com elevado nível de exigências e críticas sempre oportunas e construtivas;

À Companhia Ind. de Cerâmica - Cincera S.A. que viabilizou os testes práticos da pesquisa.

SUMÁRIO

Lista de Figuras e Tabelas.....	ix
Lista de Abreviaturas.....	xv
Resumo.....	xvii
Abstract.....	xviii
 CAPÍTULO 1 – Introdução.....	 1
1.1- Objetivos do Trabalho.....	4
1.2- Ineditismo e Contribuição Científica.....	5
1.3- Estrutura do Trabalho.....	6
 CAPÍTULO 2 – Manutenibilidade.....	 7
2.1- Justificativa para Escolha do Problema a ser Resolvido.....	7
2.2- Manutenibilidade	10
2.2.1- Áreas de Domínio dos Indicadores de Manutenibilidade.....	18
2.3- Ciclo de Projeto para Manutenibilidade.....	21
2.4- Métodos Utilizados para Análise da Manutenibilidade.....	25
2.4.1- Avaliação da Manutenibilidade através de Diagrama e Matriz – <i>Maintainability Attributes Facilitation Permanent Matrix</i>	28
2.4.2- Métodos para Predeterminar Tempos nas atividades de Manutenção.....	34
2.4.2.1- Método I: Cálculo do tempo médio de manutenção corretiva.....	35
2.4.2.2- Método II: Método para determinar o tempo de atividades de manutenção preventiva.....	36
2.4.3- Processo de Análise da Manutenibilidade.....	38
2.4.3.1- Análise de Manutenibilidade para Projeto de Novos Produtos.....	38
2.4.3.2- Análise de Manutenibilidade para Reforma de Produtos Existentes.....	43
2.5- Teste de Avaliação da Manutenibilidade em Produtos/ Sistemas.....	45
2.6- Sistemas de Apoio/Suporte Logístico para Manutenção – <i>Supportability</i>	50

2.7- Ferramentas Especiais como Auxílio e/ou Complemento a Características de Manutenibilidade.....	52
2.8- Análise de Custo para Incorporação de Características de Manutenibilidade.....	54
2.9- Possíveis Ramos de Estudo da Manutenibilidade.....	57
CAPÍTULO 3 - Ferramentas a Serem Utilizadas no Desenvolvimento do Modelo....	61
3.1- Justificativa para a Escolha do Método.....	61
3.2- Escolha da Metodologia a ser Utilizada no Desenvolvimento do Modelo.....	62
3.2.1- Principais Características da MCDM – Escola Americana.....	63
3.2.2- Principais Características da MCDA – Escola Européia.....	64
3.3- Ferramentas e Métodos Utilizados no Estágio Atual do Estado da Arte.....	66
3.4- O Método MCDA- Multicritério de Apoio à Decisão.....	68
3.4.1- Escolha dos Fatores de Análise – PVFs.....	70
3.4.1.1- Propriedades que devem cumprir os PVFs.....	72
3.4.1.2- Arborescência dos Fatores – PVFs.....	73
3.4.2- Definição dos Descritores ou Pontos de Vista Elementares - PVEs.....	75
3.4.2.1- Descritores Construídos pela Combinação entre Níveis de PVEs.....	79
3.4.2.2- Escala Ordinal dos Descritores.....	81
3.4.3- Função de Valor dos Descritores – Escala de <i>Macbeth</i>	82
3.4.3.1- Inconsistência nos Julgamento de Valor.....	87
3.4.3.2- Transformação da Escala Macbeth em Escala de Referência–Bom e Neutro..	89
3.4.3.3- Teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal.....	91
3.4.4- Determinação das Taxas de Substituição.....	94
3.4.5- Análise de Sensibilidade do Modelo.....	102
CAPÍTULO 4 - Modelo para Avaliação dos Indicadores de Manutenibilidade.....	105
4.1- Apresentação do Modelo.....	105
4.2- Parte 1: Determinação das Escalas de Valor a serem Utilizadas pelo Modelo.....	110

4.2.1- Fase 1: Escolha dos Indicadores de Manutenibilidade.....	111
4.2.2- Fase 2: Teste de Propriedades que Devem Cumprir os Indicadores.....	113
4.2.3- Fase 3: Definição e Construção dos Descritores Correspondentes aos Indicadores (Ii).....	115
4.2.4- Fase 4: Construção das Funções de Valor dos Indicadores.....	123
4.2.4.1- Transformação das Escalas de Valor em Escalas de Referências para os Níveis Bom e Neutro.....	127
4.2.5- Fase 5: Teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal.....	127
4.2.6- Fase 6: Obtenção das Taxas de Substituição ou pesos de Ponderação dos Indicadores de Manutenibilidade.....	130
4.2.7- Fase 7: Análise da Sensibilidade do Modelo.....	132
4.3- Parte 2: Desenvolvimento do Modelo de Cálculo para obtenção do Índice de Manutenibilidade.....	135
4.3.1- Fase 1: Desenvolvimento da Metodologia e Expressões para Obtenção do Índice de Manutenibilidade.....	135
4.3.2- Fase 2: Metodologia para Aplicação do Modelo na Avaliação de Características de Manutenibilidade.....	140
4.3.3- Fase 3: Método para Rastreamento das Características de Manutenibilidade Fortes e Fracas.....	142
CAPÍTULO 5 – Aplicação do Modelo para Avaliação dos Indicadores de Manutenibilidade e Testes de Verificação.....	145
5.1- Parte 1: Aplicação do Modelo para avaliar os indicadores e Índices de Manutenibilidade.....	147
5.2- Parte 2: Aplicação do Método de Rastreabilidade para detectar Características Fortes e Fracas de Manutenibilidade.....	154
5.3- Parte 3: Execução do Teste de Desmontagem e Montagem.....	156
5.4- Parte 4: Análise da Funcionalidade e Desempenho do Modelo.....	159
CAPÍTULO 6 – Conclusões.....	165

6.1- Sugestões para Trabalhos Futuros.....	168
Referências Bibliográficas.....	169
Bibliografia.....	172
Anexo A- Conceito Estatístico de Manutenibilidade	174
Anexo B- Metodologia de Projeto adotado no NeDIP.....	179
Anexo C- Ciclo Geral das Atividades da Manutenção Corretiva	180
Anexo D- <i>Check-List</i> Generalizado para Análise de Manutenibilidade	181
Anexo E- Síntese de Programas de Suporte à Análise e Projeto de Manutenibilidade por Computador	183
Anexo F- Recomendações para Espaços Requeridos, Painéis de Controle e Fixação de Componentes	186
Anexo G- Tabela de Fatores de Manutenibilidade para Cálculo do Tempo em Atividades de manutenção corretiva	190
Anexo H- Ferramentas Especiais	195
Anexo I- Método para Análise Funcional de Processos – FAST	200
Anexo J- Preenchimento das Baterias de teste para verificação de exigências.....	202
Anexo K- Preenchimento das Matrizes para obtenção das Escalas de Valor dos Indicadores de Manutenibilidade e Taxas de substituição.....	205
Anexo L- Preenchimento das Matrizes para Verificar o teste de Independência Preferencial Ordinal e Cardinal Mútua.....	211
Anexo M- Gráficos para Análise de Sensibilidade do Modelo Construídos através do Software Hiview.....	214
Anexo N- Diferentes Formas de Ponderação da Frequência de Manutenção para Obter o Índice de Manutenibilidade.....	217
Anexo O- Apresentação dos Produtos Utilizados para Teste na Versão Original e Modificado.....	222

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Influência dos Ramos da Confiabilidade e Manutenibilidade Sobre a Disponibilidade.....	10
Figura 2.2- Fases do Ciclo de Projeto de Produtos/ Sistemas incluindo Manutenibilidade.....	22
Figura 2.3- Família Típica de características de Manutenibilidade.....	29
Figura 2.4- Valores para Avaliação das características: Simplicidade, Tribologia e Documentação.....	30
Figura 2.5- Modelo de Representação Gráfica – <i>Graph teoretical Concepts</i>	30
Figura 2.6- Relação combinatória e valor obtido do grau de facilitação entre características para um exemplo hipotético.....	31
Figura 2.7- Função de Regressão Logarítmica da Expressão 2.9.....	36
Figura 2.8- Fases para Análise, Desenvolvimento e Teste da Manutenibilidade em Novos Produtos/Sistemas.....	38
Figura 2.9- Fases para Análise, Desenvolvimento e Teste de Avaliação da Manutenibilidade na reforma de Produtos/ Sistemas existentes.....	43
Figura 2.10- Suportabilidade como Característica de um Produto/Sistema no Contexto do Sistema de Manutenção.....	52
Figura 2.11- Relação entre o Valor de Manutenibilidade, Custo de Incorporação e Custo do Ciclo de Vida.....	55
Figura 2.12- Ramos de estudo da Manutenibilidade enfocando a Disponibilidade.....	58
Figura 2.13- Evolução dos custos da manutenção no Brasil na década de 1991 a 1999 segundo % Custo manutenção/Custo Faturamento Bruto.....	60
Figura 3.1- Comparação das diferenças básicas entre as Escolas Européia e Americana.....	66
Figura 3.2- Ciclo do Método MCDA para Determinar a Função de Valor de uma Variável Lingüística e suas Taxas de Substituição.....	70
Figura 3.3- Árvore de PVFs Pertencentes a Características de Manutenibilidade.....	74

Figura 3.4- Árvore de Níveis de Impacto do Fator Tipo de Fixações/ União.....	78
Figura 3.5- Possíveis estados dos PVFs “Acessibilidade e Visibilidade”.....	80
Figura 3.6- Níveis do descritor construído para avaliar o fator Facilidade de Operação.....	80
Figura 3.7- Descritor Ordinal do Fator Tipo de Fixações/ União.....	81
Figura 3.8- Categorias semânticas da escala de atratividade utilizada por <i>Macbeth</i>	84
Figura 3.9- Preenchimento da Matriz de <i>Macbeth</i> para o descritor “Tipo de Fixação União”.....	85
Figura 3.10- Resultado da Matriz <i>Macbeth</i> , Correspondente à Função de Valor do PVF “Tipo de Fixação/ União”.....	86
Figura 3.11- Gráfico da Função de Valor do Fator - Tipo de Fixação/ União.....	86
Figura 3.12- Escala de valores dos níveis de impacto (PVEs) do Descritor do PVF “Tipo de Fixação/ União”.....	87
Figura 3.13- Exemplo Prático de Julgamento na Matriz de Juízo de Valor para Verificar Consistência Semântica.....	88
Figura 3.14- Escala transformada para os níveis Bom e Neutro do PVF – “Tipo de Fixação/ União”.....	90
Figura 3.15- Gráfico da Função Transformada (Bom – Neutro).....	91
Figura 3.16- Teste de Independência Preferencial Ordinal Mútua.....	92
Figura 3.17- Teste de Independência Preferencial Cardinal Mútua.....	93
Figura 3.18- Árvore de PVFs Pertencentes à Facilidade de Desmontagem e Montagem para Análise de Manutenibilidade.....	95
Figura 3.19- Recurso Prático para Avaliar a preferência entre duas Opções de Perfis de Impacto Relativos entre PVFs para preenchimento da matriz de ordenação.....	96
Figura 3.20- Matriz de ordenação preferencial dos PVFs.....	97

Figura 3.21- Recurso Pratico para Avaliar o Nível de Atratividade entre duas Opções de Perfis de Impacto Relativos entre PVFs para preenchimento da matriz de Macbeth.....	99
Figura 3.22- Matriz de <i>Macbeth</i> preenchida com os juízos de valor segundo atratividade para determinar as taxas de substituição dos PVFs.....	100
Figura 3.23- Exemplo de Escala de valor cardinal e taxas de substituição dos PVFs.....	101
Figura 3.24- Exemplo de Árvore de fatores de Manutenibilidade com seus Pesos Relativos.....	101
Figura 4.1- Simulação das diferentes etapas de desenvolvimento do modelo proposto.....	109
Figura 4.2- Sequência a ser seguida para desenvolvimento do modelo.....	110
Figura 4.3- Família de indicadores candidatos pertencentes à facilidade de desmontagem e montagem para manutenção.....	113
Figura 4.4- Baterias de Exigências a serem Cumpridas pelos Indicadores de Manutenibilidade.....	114
Figura 4.5- Árvore da Família de Indicadores pertencentes à Facilidade de Desmontagem/ Montagem.....	115
Figura 4.6- Sequência dos passos para construção dos descritores.....	116
Figura 4.7- Baterias de Exigências a serem Cumpridas pelos níveis de impacto dos descritores.....	417
Figura 4.8- Descritor do Indicador “Tipo de Fixação/ União”.....	118
Figura 4.9- Descritor do Indicador “Ajustagem e calibragem”.....	119
Figura 4.10- Descritor do Indicador “Simplicidade Estrutural/ Funcional”.....	120
Figura 4.11- Possíveis Estados do Descritor Acessibilidade e Visibilidade.....	121
Figura 4.12- Combinações dos Níveis do Descritor Construído do Indicador Acessibilidade e Visibilidade.....	121

Figura 4.13.a- Descritor do Indicador Acessibilidade e Visibilidade obtido pelas Combinações.....	122
Figura 4.13.b- Descritor definitivo do Indicador “Acessibilidade e Visibilidade”.....	122
Figura 4.14- Descritor do Indicador “Alcançabilidade e Manejabilidade”.....	123
Figura 4.15- Escala de valor de Manutenibilidade do Indicador “Tipo de Fixação/união”.....	124
Figura 4.16- Gráfico da Função de Valor do Indicador Tipo de Fixação/ União.....	124
Figura 4.17- Escala de valor de Manutenibilidade do Indicador Simplicidade Estrutural/ Funcional.....	125
Figura 4.18- Escala de valor de Manutenibilidade do Indicador Acessibilidade e Visibilidade.....	125
Figura 4.19- Escala de valor de Manutenibilidade do Indicador Alcançabilidade e Manejabilidade.....	126
Figura 4.20- Escala de valor de Manutenibilidade do Indicador Ajustagem e Calibragem.....	126
Figura 4.21- Matriz de teste de Independência Preferencial Ordinal Mútua dos indicadores (I_i) em ordem crescente ($i = 1$ até $i=n$).....	128
Figura 4.22- Matriz de teste de Independência Preferencial Ordinal Mútua dos indicadores (I_i), na ordem decrescente de $i=n$ até $i=1$	129
Figura 4.23- Matriz de teste de independência preferencial cardinal mútua dos fatores (I_i).....	130
Figura 4.24 - Síntese do procedimento para obtenção das taxas de substituição.....	131
Figura 4.25- Pesos de ponderação (P_i) dos Indicadores de Manutenibilidade (I_i).....	132
Figura 4.26- Síntese do procedimento para aplicação do modelo.....	142
Figura 4.27- Matriz para Rastreamento das Características de Manutenibilidade Fortes e Fracas.....	143
Figura 4.28- Síntese do método para identificar as Características de Manutenibilidade Fortes e Fracas.....	144

Figura 5.1- Seqüência a ser adotada para aplicação pratica do modelo.....	145
Figura 5.2- Árvore estrutural do ventilador radial.....	147
Figura 5.3- Árvore de manutenção com o fluxograma das atividades de desmontagem/ montagem.....	148
Figura 5.4- Valor dos indicadores de manutenibilidade (V_i) para as atividades de manutenção “Substituir Correias”.....	149
Figura 5.5- Valor dos indicadores de manutenibilidade (V_i) para as atividades de manutenção “Substituir Rolamentos”.....	150
Figura 5.6- Valores de manutenibilidade obtidos para a versão original do produto de teste.....	153
Figura 5.7- Valores de manutenibilidade obtidos para a versão modificada do produto de teste.....	155
Figura 5.8- Valores dos custos de Fabricação e custo de Hora/ Homem de Manutenção em Reais (\$R).....	159
Figura 5.9- Evolução dos valores de Manutenibilidade comparando-se Versão Original e Modificada.....	161
Figura 5.10- Valores de Redução dos Tempos (MRT) e Custos de Manutenção.....	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Valores dos testes de desmontagem/ montagem na versão original e modificada do produto.....	158
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRAMAN- Associação Brasileira de Manutenção;
ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
 β - Fator de Forma da Distribuição de Weibull;
 λ - Taxa de Falha;
CCV- Custo do Ciclo de Vida;
CDP- Custo de Depreciação do Produto;
CDI- Custo de Depreciação das Instalações (área, iluminação, energia, etc);
CE- Custo de Energia;
CO- Custo de Operação do Produto/Sistema;
CM- Custo de Manutenção do Produto/Sistema;
CMC- Custo de Manutenção Corretiva;
CMP- Custo de Manutenção Preventiva/ Preditiva;
CPR- Custo de Peças e Materiais de Reposição;
CR- Coeficiente de Reparabilidade;
CRM- Custo de Recuperação/ Reformas para Melhorias do Produto/Sistema;
C(t)- Confiabilidade;
D(t)- Disponibilidade;
FMEA- Análise dos Modos e Efeitos das Falhas;
FTA- Análise da Árvore de Falha;
I(i)- Indicador de Manutenibilidade;
Im- Índice de Manutenibilidade Local;
Img- Índice de Manutenibilidade Global;
MCC- Manutenção Centrada em Confiabilidade;
MCDA- Análise de Multicritérios em Apoio a Decisão;
MCDM- Construção de Multicritérios para Decisão;
MMH/OH- Tempo de Manutenção em Homem /Hora por Hora de Operação;
MTBF- Tempo Médio de Bom Funcionamento;
MTBMu- Tempo Médio de Manutenção Corretiva;
MTBMs- Tempo Médio de Manutenção Preventiva/ Preditiva;
MTEF- Tempo Médio Entre Falhas;
MMT- Tempos Média de Manutenção;

MRT- Tempo Médio de Reparo;

M(t)- Valor Estatístico de Manutenibilidade;

μ - Taxa de Reparo;

PVE- Ponto de Vista Elementar;

PVF- Ponto de Vista Fundamental;

R- Coeficiente de Correlação;

S(t)- Suportabilidade;

SIm- Subíndice de Manutenibilidade;

TPM- Manutenção para a Produtividade Total;

Te- Tempo de Espera;

Tme- Tempo Médio de Espera;

Tms- Tempo Médio de Serviço;

TR- Tempo de Reparo;

Ts- Tempo de Serviço Pleno;

V- Valor Escalar dos Indicadores de Manutenibilidade.

RESUMO

O projeto de produtos/ sistemas hoje exige a inclusão de características de manutenibilidade para facilitar as atividades de manutenção e, com isto, reduzir o tempo de intervenção para reparo, custo do ciclo de vida e melhoramento da disponibilidade e regularidade operacional.

Este trabalho desenvolve um modelo de avaliação escalar dos indicadores de manutenibilidade, utilizando funções de valor, obtidas com a aplicação do MCDA (Multicritério de Apoio à Decisão). Os valores dos indicadores obtidos são correlacionados à frequência de intervenção de manutenção de cada componente/ conjunto, para determinar o índice de manutenibilidade global de produtos/ sistemas.

Com esta pesquisa, direcionada à manutenibilidade, pretende-se facilitar: a especificação de produtos/ sistemas adaptados às necessidades de manutenção, à comparação entre diferentes opções de um mesmo produto, à correlação do índice de manutenibilidade com outros parâmetros de interesse no desempenho das atividades de manutenção, entre outras questões no tratamento de características de manutenibilidade, por parte do projetista, produtor e consumidor.

Palavras - chave: Índice de Manutenibilidade - Manutenibilidade - Manutenção

ABSTRACT

Nowadays products/systems design demands the inclusion of maintainability characteristics to facilitate the maintenance activities and, doing so, to reduce the time of intervention for repair, cost of the life cycle and improvement of the readiness and operational regularity.

This work develops an scale evaluation model of the maintainability indicators, using functions of value obtained with the application of MCDA (Multicriteria of Support to the Decision). The values of the obtained indicators are correlated to the frequency of intervention of maintenance of each component / group, to determine the index of global maintainability of products / systems.

With this, and aiming the maintainability, it is intended to facilitate: the products/systems specification adapted to the maintenance needs, to the comparison among different options of a same product, to the correlation of the maintainability index with other parameters of interest in the performance of the maintenance activities, among other subjects in the treatment of maintainability characteristics on the part of the planner, producer and consumer.

Key words: Maintainability Index - Maintainability - Maintenance

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura da globalização de mercados, a recessão econômica ameaça a maioria das empresas. Com este quadro, as organizações, em geral, estão relutantes para investir em novos equipamentos/ instalações, preferindo a opção de recuperar e reformar os produtos/ sistemas atuais (PATTON, 1994).

Geralmente, a visão atual de projeto centraliza mais aspectos estruturais/funcionais e de confiabilidade, desconsiderando, muitas vezes, a certeza da necessidade de manutenção do produto durante sua vida útil, aumentando-se assim seu custo de ciclo de vida e até dificultando sua aceitação no mercado.

Por outro lado, até pouco tempo, muitos produtos como eletrodomésticos eram projetados para sofrer reparos e manutenções durante o ciclo de vida, com média de dez anos. Hoje, a maioria desses produtos passou a ser descartável, com um ciclo de vida médio de cinco anos e ciclo de projeto de seis meses (PATTON, 1994).

Entretanto, muitos outros produtos/ sistemas são projetados para receber atividades de manutenção, seja pelo alto custo de reposição ou longo tempo de vida útil. Exemplos característicos destes casos são as aeronaves, com ciclo de vida médio de 40 anos e ciclo de projeto de três anos, sendo que este tempo de ciclo de projeto está em rápido declínio (PATTON, 1994).

Considera-se como ciclo de projeto uma das grandes fases ou atividades envolvidas no processo de desenvolvimento de produtos/ sistemas (ver figura 2.3), ou reforma de produtos existentes para atualização tecnológica, onde a manutenibilidade é considerada uma das fases fundamentais deste ciclo (PATTON, 1994; BLANCHAR et al., 1995). Neste contexto, justifica-se a necessidade de estudo do conceito da manutenibilidade.

Por isso, busca-se neste trabalho conhecer melhor as variáveis que influenciam a manutenibilidade de um produto, pois se considera que há uma lacuna, pela falta de explicação analítica e avaliação quantitativa do conjunto dos fatores que intervêm nessa manutenibilidade.

Assim, este trabalho procura determinar um modelo de avaliação quantitativa dos indicadores de manutenibilidade, visando definir as necessidades que devem cumprir os

sistemas de manutenção (produtos/sistemas, instalações, organização, mão de obra, logística, etc.). Objetiva-se com isto, conhecer antecipadamente a influência dos fatores de manutenibilidade sobre o projeto de produtos/sistemas, no desempenho das atividades de manutenção, medida através de parâmetros como tempo médio de reparo (MRT), taxa de reparo (μ), disponibilidade e regularidade operacional, custo, entre outros indicadores de eficiência da manutenção. Por isto, o modelo desenvolvido comporta-se como eficaz ferramenta de auxílio, podendo ser inserido nas fases do projeto, especificamente na fase de detalhamento do projeto (BACK e FORCELLINI, 1997).

Isto permitirá que a escolha e especificação de fatores de manutenibilidade, a serem incorporadas no projeto sejam mais eficazes diminuindo o risco de se considerarem fatores com pouca importância para atingir o nível de manutenibilidade desejado, ou que a escolha inviabilize o projeto economicamente.

Como consequência da incorporação das características de manutenibilidade no projeto, consegue-se influir nos custos operativos do produto/sistema (custos do ciclo de vida útil), afetando-se para isto: o tempo médio de reparo (MRT) e taxa de reparo (μ); os trabalhos improdutivos e retrabalhos que resolvem o problema da baixa produtividade do processo de manutenção (ver coeficiente de reparabilidade); o tempo médio de bom funcionamento (MTBF); através de melhorias no projeto visando prevenir e eliminar falhas; o tempo improdutivo com o melhoramento da manutenibilidade do produto, logística de manutenção e aprimoramento da mão de obra; a qualidade de serviço; a complexidade das atividades de manutenção; a disponibilidade final englobando confiabilidade e manutenibilidade entre outros.

Por outro lado, a introdução de características de manutenibilidade, no projeto, permitirá a previsibilidade dos tempos de intervenção de manutenção com margens de precisão aceitáveis, o que possibilitará o uso eficiente de tempos padrão que poderão também ser usados como índice para medida da eficiência do desempenho de sistemas de manutenção.

Assim, o enfoque que será dado à manutenibilidade, neste estudo, está centrado num modelo de avaliação que permita medir as características de manutenibilidade contidas no projeto, na procura do aumento da eficácia nas atividades de manutenção, melhora da disponibilidade global e redução do custo de ciclo de vida útil de produtos/sistemas.

A importância para a redução dos custos de manutenção (custo do ciclo de vida útil), não está centrada unicamente no montante de seu valor, mas também na influência sobre a regularidade do montante mensal e até anual, condição importante para o fluxo de caixa de qualquer empresa.

De forma mais ampla, o problema da manutenibilidade atinge a projetistas, fabricantes e usuários. Os projetistas, para desenvolverem produtos com enfoque de manutenibilidade visando melhorar os MRT, taxas de reparo μ e disponibilidade, além de sua funcionalidade, confiabilidade, custo de produção e operação; os fabricantes, para produzirem produtos segundo expectativas desejadas pelo mercado em termos de requisitos nas atividades de manutenção (manutenibilidade); os usuários, para especificarem exigências de manutenibilidade através de requisitos de projeto para aquisição ou reforma de produtos/sistemas e através de parâmetros estatísticos, juntamente com o índice de manutenibilidade, diagnosticarem necessidades de melhorias no produto.

Em síntese, da mesma forma que na atualidade, o gerenciamento e controle da manutenção evoluíram para uma manutenção centrada em confiabilidade, com o estudo da manutenibilidade poder-se-á propiciar o desenvolvimento de um modelo para um gerenciamento e controle da manutenção, satisfazendo requisitos de manutenibilidade (BARROS, 1995).

Este modelo poderá também auxiliar a avaliação do valor econômico da manutenibilidade, através dos benefícios auferidos com tempos médios de manutenção (MRT), confiabilidade na previsão dos tempos de parada planejada e ganho de disponibilidade, entre outros, em função dos esforços necessários para introduzir características de manutenibilidade. Isto permitirá verificar a conveniência técnico-econômica do investimento. Por outro lado, esta avaliação poderá diagnosticar e hierarquizar as características necessárias a serem introduzidas ou melhoradas no projeto, para atingir as especificações desejadas de manutenibilidade em produtos/sistema.

A originalidade do tema está na abordagem do conceito de manutenibilidade através das características de projetos (indicadores), mensurados quantitativamente através de escalas de valor, referenciando a manutenibilidade de produtos/ sistemas, através de índices específicos correlacionados segundo áreas da função de manutenção, fluxos de atividades de manutenção e suas frequências de manutenção.

A contribuição teórica está na construção de funções de valor escalar dos indicadores de manutenibilidade desenvolvidas pelo MCDA, que permitam correlacionar e quantificar as diferentes características de um projeto e a relação matemática encontrada para a obtenção dos índices que avaliam a influência destes indicadores de forma parcial, local e global, sobre o projeto de produtos/sistemas. Índice parcial, quando representa o valor de manutenibilidade agregado por toda a família de indicadores avaliados para uma atividade específica de manutenção; local, quando representa o valor médio de manutenibilidade obtido com os índices parciais que influenciam a manutenção de uma peça/ conjunto e global que representa o valor final de manutenibilidade de um produto para uma determinada área ou grupo de função de manutenção (montagem/ desmontagem, lubrificação, localização de falhas, etc.).

Espera-se que este trabalho venha auxiliar a análise, avaliação e diagnóstico em projetos de novos produtos/sistemas ou reformas para melhorias dos mesmos, tornando a manutenibilidade um conceito prático e aplicável na maximização do desempenho de sistemas de manutenção.

1.1- Objetivos do Trabalho

Ao se utilizar o conceito de manutenibilidade para projetos de produtos/sistemas, devem ser focalizados os objetivos a serem atingidos. Neste trabalho, a preocupação está centrada na busca de melhorias das atividades de manutenção, seja para reparo, diagnóstico, conservação, lubrificação, limpeza, entre outras.

Esta melhoria procura não só a minimização dos tempos de intervenção e custos de manutenção, melhorando a disponibilidade, confiabilidade na previsão de paradas planejadas e regularidade operacional, mas também simplificar a atividade para reduzir a intensidade cognitiva do homem de manutenção, melhorando a qualidade, produtividade e riscos à segurança pessoal e ambiental. Tudo isto para a necessidade final de redução de custos do ciclo de vida de produtos/sistemas.

Assim, este trabalho procura fornecer critérios para o melhoramento, diminuição e até eliminação das necessidades de manutenção de produtos/sistemas, quando tecnológica e economicamente viável.

Portanto, o objetivo geral do trabalho será desenvolver um modelo para avaliar quantitativamente as características de manutenibilidade (indicadores), que influenciam as

atividades de desmontagem e montagem para manutenção de produtos/ sistemas, correlacionados a índices de manutenibilidade.

Os objetivos específicos são:

- esclarecer as características de manutenibilidade que influenciam a desmontagem e montagem para manutenção de produtos/sistemas;
- ponderar os indicadores de manutenibilidade de forma quantitativa através de funções de valor;
- correlacionar estes indicadores para serem representados de forma quantitativa, através de índices de manutenibilidade.

Em síntese, busca-se estabelecer um modelo cuja avaliação e análise da manutenibilidade em produtos/sistemas, sirva para rastrear pontos fortes e fracos da manutenibilidade de um projeto.

1.2- Ineditismo e Contribuição Científica

Como foi colocado no Capítulo 1, o ineditismo deste trabalho está na abordagem do conceito de manutenibilidade, através de um modelo de mensuração escalar dos indicadores que representam as características de projeto, através de funções de valor, que possibilitam analisar e avaliar a magnitude de contribuição ou influência destes, sobre o desempenho de um produto/sistema nas atividades de desmontagem/ montagem para manutenção, referenciando-se a manutenibilidade através de índices específicos, correlacionados segundo áreas da função de manutenção, fluxos de atividades de manutenção e frequências de manutenção.

A contribuição científica está na construção justificada das funções de valor escalar dos indicadores de manutenibilidade através do MCDA, para avaliação e quantificação pela comparação das escalas de valor do modelo com as características de projeto do produto/sistema analisado; e a expressão de correlação para obtenção dos índices que avaliam a influência destes indicadores de forma parcial, local e global. Índice parcial, quando representa o valor de manutenibilidade agregado por toda a família de indicadores avaliados para uma atividade específica de manutenção; local, quando representa o valor médio de manutenibilidade obtido com os índices parciais que influenciam a manutenção de uma peça/conjunto e global que representa o valor final de manutenibilidade de um produto para uma

determinada área ou grupo de função de manutenção (montagem/ desmontagem, lubrificação, localização de falhas, etc.).

Esta representação numérica dos indicadores de manutenibilidade introduzidos no projeto e sua representação através de índices específicos, poderão ser comparados com outros parâmetros de referência como MRT, $M(t)$, custo de ciclo de vida, disponibilidade, entre outros.

Por outro lado a análise, avaliação e comparação dos valores de manutenibilidade obtidos com o modelo, permitirá rastrear pontos fortes e fracos no projeto, auxiliando decisões de melhoria do produto, sendo esta mais uma contribuição do trabalho.

A contribuição deste trabalho também está na construção de uma ferramenta de auxílio para:

- o projetista definir, desenvolver e implantar as características de manutenibilidade no projeto de produtos/sistemas, ou na reforma/ re-projeto de produtos existentes;
- o usuário, medir e/ou especificar características de manutenibilidade existentes no produto/sistema adquirido ou para adquirir, auxiliando-o no processo de decisão;
- o fabricante ou construtor, avaliar a qualidade do produto fabricado em termos de satisfação das especificações exigidas pelo mercado.

Em síntese, a presente proposta de trabalho procura oferecer uma ferramenta de avaliação quantitativa da manutenibilidade, focalizando a adequação de produtos/sistemas às atividades de manutenção (facilidade).

1.3- Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho está constituída de seis capítulos.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre manutenibilidade com definições, descrições, premissas e formas de tratamento que estão sendo abordadas por diversos autores.

No Capítulo 3 são descritas as ferramentas que são utilizadas para o desenvolvimento do modelo proposto, com justificativas para sua escolha.

No Capítulo 4 apresenta-se a obtenção das funções de valor e as taxas de substituição do modelo proposto para avaliar de forma escalar os indicadores de manutenibilidade, juntamente com a análise de sensibilidade das escalas obtidas através da metodologia HIVIEW, e o desenvolvimento da expressão que correlaciona o valor dos indicadores para determinar o índice de manutenibilidade global nas atividades de desmontagem e montagem para tarefas de manutenção.

No Capítulo 5 é apresentada a aplicação do modelo desenvolvido, com a explicação da metodologia de cálculo e testes realizados através de atividades de desmontagem/ montagem para verificar o comportamento do modelo no processo de avaliação dos indicadores de manutenibilidade, justificando os resultados obtidos nas considerações finais do trabalho.

O Capítulo 6 apresenta a conclusão final e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - MANTENABILIDADE

Neste capítulo abordar-se-á uma descrição mais detalhada e profunda da manutenibilidade, tratando dos elementos e ambiente que a compõem; a forma atual de como o problema de manutenibilidade vem sendo resolvido, destacando os limites das metodologias e modelos atuais de tratamento da mesma. Apresentam-se também, as características do ineditismo e contribuição científica que este trabalho oferece à área de atuação do problema.

2.1 – Justificativas para escolha do problema a ser resolvido

Desde os primórdios dos estudos de Manutenção, existe a preocupação com a previsão do tempo gasto em serviços de manutenção, em que o tempo padrão ou predeterminado, dificilmente se ajusta ao tempo real, provocando distorções no planejamento das paradas planejadas para manutenção.

Motivos característicos desta atividade geralmente inviabilizam o uso de tempos padrão, como também, o aumento de sua eficiência, porque as atividades de manutenção têm características diferenciadas e até exclusivas, com tarefas nem sempre repetitivas, em que serviços idênticos terão em geral tempo de execução diferenciado. Alguns destes motivos são:

- tipo de projeto do produto;
- impossibilidade da detecção antecipada da falha;
- variação na habilidade dos recursos humanos;
- tipo de organização na administração e logística da manutenção;
- extensão ou gravidade da falha;
- variabilidade entre serviços;
- condições de conservação do equipamento, entre outros.

Para Nakajima (1989), o rendimento global médio dos produtos/sistemas está em torno de 50%. Este rendimento global é dado pelo produto das taxas de disponibilidade, de velocidade de produção e de produtos reprovados.

Experiências têm demonstrado que de 60 a 75% do custo total do ciclo de vida dos produtos/sistemas reparáveis, estão associados aos gastos de operação e conservação/manutenção (BLANCHARD et al., 1995).

Estudos de R. K. Mobley (apud BLANCHARD et al., 1995) mostram que, de forma geral, 15 a 40% (média de 28%) do custo final do produto fabricado são gastos com atividades de operação e conservação dos sistemas de produção.

Os dois maiores fatores de contribuição nos custos de conservação são a mão de obra (35,46%) e materiais de reposição (33,92%) (ABRAMAN, 1997). Como referência, os dez maiores produtores petroquímicos gastam juntos 15 bilhões de dólares anuais em manutenção, dos quais em média, 4,3% destes são gastos com materiais de reposição (PATTON, 1994).

De acordo com estudos de T. Wireman (apud BLANCHARD et al., 1995) nas atividades de manutenção de emergência ou corretivas, 50% da carga de trabalho dos operários de manutenção são gastos com atividades não produtivas (ver coeficiente de reparabilidade no item 2.2) do tipo: deslocamentos, procura de orientação e ferramentas, procura de avarias, etc.

J. Patton (1994) assegura que o retorno de investimentos em características de manutenibilidade no projeto é de 50: 1, ou seja, para cada \$1,00 investido em manutenibilidade obtém-se \$50,00 de retorno em benefícios. Isto se justifica porque as características de manutenibilidade diminuem os valores de desperdício e ineficiência apresentados anteriormente.

Por outro lado, a constante pressão para diminuir custos de manutenção e aumentar a disponibilidade global dos sistemas funcionais, faz da manutenção um elo chave no contexto do sistema produtivo para maximizar produtividade.

A figura 2.1 mostra os fatores que influenciam diretamente a disponibilidade e regularidade funcional dos equipamentos e instalações, que junto ao Anexo A (apresentação do conceito estatístico de manutenibilidade), pode-se verificar que manutenibilidade é um complemento da confiabilidade para determinar a disponibilidade, que segundo Nakajima (1989), esta última deve ser com eficiência global, ou seja, resultado do produto de três eficiências, a produtiva em termos de tempo de produção efetivo / tempo programado; a eficiência de velocidade em termos de produção horária efetiva / produção horária nominal; e a eficiência de qualidade em termos de produtos aprovados / produtos produzidos.

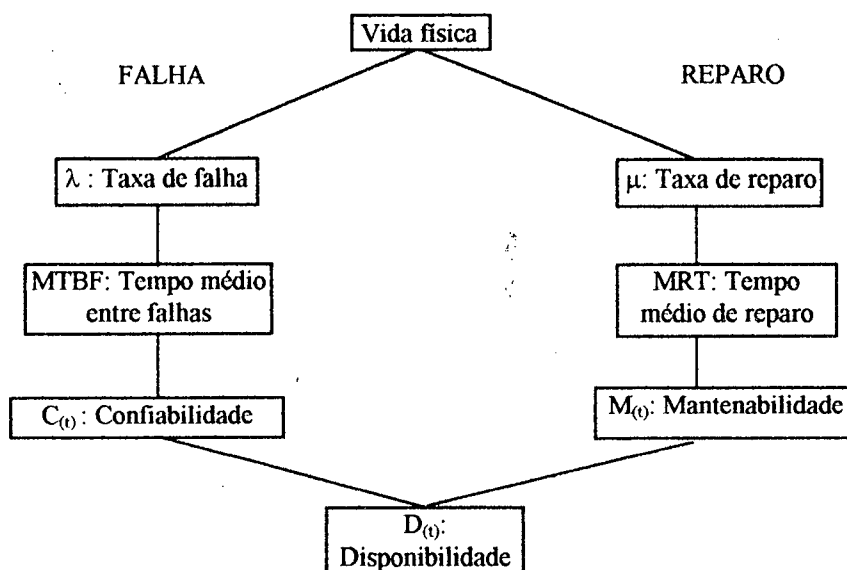


Fig. 2.1 - Influência dos ramos da confiabilidade e manutenibilidade sobre a disponibilidade (PALLEROSI, 1993).

O ramo da confiabilidade mostrado na figura 2.1 tem merecido numerosos estudos nos últimos anos, com abundante arsenal de propostas e metodologias para a solução de problemas. Já, o estudo da manutenibilidade é mais recente, com lacunas de conhecimento e falta de procedimentos a serem preenchidas para a solução eficaz de problemas nesta área, principalmente no que tange ao estudo das características de manutenibilidade.

Por isto, interessa estudar o conceito de Manutenibilidade em todas suas formas, além de sua avaliação estatística, como: característica, estrutura, influencia, dependência, valores, correlação, etc, que definem a manutenibilidade em nível de projeto de sistemas de manutenção integrados pelo processo, produto, mão de obra, logística, meio ambiente, entre outros. Considera-se, também importante, oferecer uma contribuição de aplicação prática deste conceito, como o caso de um Índice de Manutenibilidade, que avalie estas características de forma quantitativa nos produtos/sistemas que necessitam de manutenção.

2.2- Manutenibilidade

No Brasil existem, pelo menos, três denominações deste conceito: Manutenibilidade, Manutenibilidade e Manutenibilidade. Para fins deste trabalho utilizar-se-á esta última.

O conceito de Manutenibilidade foi formalmente reconhecido pelos serviços militares dos Estados Unidos em 1954, em função dos programas de confiabilidade nos fins dos anos

40. As normas (*Military Standards*) MIL-STD-470-B (1983); STD 471-A (1983) e MIL-HDBK- 472 (1984), permitiram uma melhor definição de Manutenibilidade, de seus parâmetros e de sua mensuração, onde é definida como: “uma característica de projeto e instalação que expressa a probabilidade de como um item de um equipamento ou sistema se conformará às condições especificadas dentro de um período de tempo determinado, quando a ação de manutenção é praticada de acordo com recursos e procedimentos prescritos”.

Blanchard e Lowery (1969) publicaram um dos primeiros livros sobre Manutenibilidade (hoje considerado um clássico sobre o tema) a que definem como: “característica de projeto de equipamentos e instalações que é expressa em termos de facilidade e economia de manutenção, aumentando a disponibilidade do equipamento com segurança e precisão na execução das ações de manutenção”.

A norma ABNT - NBR-5462 (1994), define Manutenibilidade como: “Probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é executada sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos”.

Como visto nas definições apresentadas, a manutenibilidade influencia na quantidade e necessidade de manutenção, no tempo médio de serviço e sua previsibilidade e assim na disponibilidade e regularidade operacional, custo, eficácia e qualidade de manutenção. Por isto, uma definição mais adequada aos conceitos e necessidades atuais deverá incluir características de projeto, logística, preparo da mão de obra, custo, ergonomia, segurança e ecologia.

O instituto de normalização da União Soviética, através da norma GOST-13377 de 1967 (apud SELIVANOV, 1972), define um conceito semelhante ao de manutenibilidade, chamado de Reparabilidade e definido como: “Propriedade de um item que consiste em sua adaptação para a prevenção, detecção e eliminação de falhas e desajustes mediante a manutenção preventiva e reparações” (SELIVANOV, 1972).

A apreciação quantitativa da reparabilidade é dada pela relação entre o tempo médio dos trabalhos produtivos e improdutivos realizados na execução de reparos e manutenção preventiva. Para isto, a norma Russa define como coeficiente de reparabilidade (Cr) a:

$$Cr = \frac{T_{mp}}{T_{mp} + T_{mi}} \quad (2.1)$$

Onde: Tmp é o tempo médio produtivo;

Tmi é o tempo médio improdutivo.

Todavia, por analogia à confiabilidade é possível enunciar o conceito de manutenibilidade $M(t)$ de forma estatística como a probabilidade de restabelecer um sistema a suas condições funcionais específicas, em limites de tempo estabelecidos, quando a manutenção é executada nas condições e meios prescritos (MONCHY, 1989).

Assim:

$$M(t) = \text{Prob} (T_{ms} < t) \quad (2.2)$$

Onde: Tms é o tempo médio de serviço;

t: é o tempo de serviço estimado.

Uma revisão das normas, que definem Mantênabilidade, mostra que este conceito trata basicamente do tempo de reparo, facilidade na execução das atividades de intervenção, economia na manutenção e disponibilidade. Assim, estas variáveis podem ser consideradas como parâmetros de referência no estudo da manutenibilidade.

Também, torna-se necessário esclarecer, ou melhor, definir o parâmetro de facilidade de manutenção, que para este trabalho será considerado como:

“conjunto de esforços e/ou recursos necessários para a execução de atividades de manutenção em produtos/sistemas”.

Assim o sistema de manutenção constituído por processo, produto, instalação, mão de obra, logística, meio ambiente, etc; deve possuir características de manutenibilidade em níveis adequados para assegurar que estes esforços/recursos sejam mínimos, na obtenção de melhores resultados dos serviços realizados em termos de tempo, custo, qualidade, segurança e preservação do meio ambiente, entre outros.

Pelo exposto, observa-se que o estudo da manutenibilidade relaciona-se com características de projeto que buscam diminuir ou, se possível, eliminar a necessidade de manutenção em produtos/sistemas que apresentem viabilidade técnico-econômica.

Acredita-se que a eliminação total da manutenção está distante de acontecer, mas será através da incorporação de performances de manutenibilidade no projeto de produtos e mais precisamente nos sistemas de manutenção, juntamente com a evolução tecnológica, que isto poderá acontecer no futuro, efetivando não só a “quebra zero”, como também, a “manutenção

zero”. As tendências atuais são para diminuir o número de intervenções de manutenção durante o ciclo de vida útil do sistema, através de componentes com maiores tempos de ciclo de vida e da compatibilidade do tempo de vida e/ou descartabilidade, quando todos os componentes utilizados no produto possuem vida útil física igual ou próxima entre os mesmos. Como exemplo, merecem destaque os óleos de transmissão de automóveis, com duração para todo o ciclo de vida útil física do bem, baterias blindadas, sistemas de prevenção da corrosão por proteção catódica de corrente impressa, sistemas de ajustes/calibração automáticos, etc.

O maior objetivo da manutenibilidade pode ser expresso como características de projeto que permitam atividades de manutenção sem grandes dispêndios de tempo e custo, baixos recursos de suporte organizacional, mão de obra e apoio logístico e com o mínimo de impacto no meio ambiente.

Os resultados destas características, podem ser medidas em função da frequência de manutenção, tempos médios de serviço, previsibilidade do tempo de serviço, taxas de reparo, disponibilidade, qualidade do serviço, custo das atividades de manutenção, etc. (PATTON, 1994; BLANCHARD et al., 1995).

O anexo A apresenta uma síntese do método para tratamento estatístico da manutenibilidade em função dos registros históricos de manutenção com o objetivo de medir o resultado destas características, que poderão ser comparadas com valores de referência especificados na fase de desenvolvimento do projeto. (PATTON, 1994; BLANCHARD et al., 1995; BARROS, 1995).

As características ou indicadores de manutenibilidade são fatores intrínsecos e extrínsecos em diferentes níveis do sistema de manutenção (produto, instalação, processo, organização, mão de obra, logística, etc.). Para tratá-los em nível de projeto, faz-se necessário especificá-los, para isto, pois foram pesquisados e adaptados de bibliografias especializadas (PATTON, 1994; BLANCHARD et al., 1995), e complementados neste estudo, através de pesquisas, auxiliadas por ferramentas como mapa cognitivo (ENSSLIM, 1998). O espectro destas características estão assim definidas:

- no produto/sistema:

1. Compatibilidade de vida útil física refere-se à condição dos componentes, que constituem o produto/sistema terem vida útil física aproximada entre si. Esta condição permite que na abertura do equipamento para uma atividade de manutenção, todos os componentes

pertencentes ao mesmo subsistema em questão tenham um desgaste ou envelhecimento similar para permitir a substituição em bloco, evitando posteriores intervenções em pouco tempo. Todavia, esta característica considera a possibilidade de que o tempo de vida útil física de seus componentes seja igual ao tempo de vida útil física projetado para o produto/sistema. Esta última condição visa à não necessidade de manutenção, dando lugar à descartabilidade;

2. Padronização e intercambiabilidade indicam características dimensionais (formas e volumes), idênticas ou semelhantes, em componentes com atividade funcional igual ou similar (independente do fabricante), permitindo sua substituição ou intercambiabilidade, sem prévia adaptação. As normas ISO 9000 contribuem para satisfazer esta característica, favorecendo também a aquisição de componentes sobressalentes e redução de estoques;
3. Modularidade refere-se ao *layout* para a instalação dos componentes de forma setorizada, formando blocos definidos em conjuntos especializados pela função e/ou característica construtiva (transmissão, comando, mecânico, elétrico, etc.), permitindo a retirada/colocação do conjunto de componentes em blocos. Esta característica evita necessidades de desmontagem/ montagem individual dos componentes;
4. Pontos de teste para o diagnóstico indicam a existência de conexões de entradas-saídas em pontos estratégicos, através de *plugs* padronizados ou similares, para acoplamento-ligação de instrumentos de medida e/ou diagnóstico, visando monitorar parâmetros vitais de funcionamento. Segundo pesquisas (BLANCHARD et al., 1995, pág. 221), 60% das atividades de manutenção corretiva são gastas em atividades de diagnóstico e localização de falhas;
5. Monitoração refere-se à existência de sensores, instalados em componentes, de forma fixa e permanente, para medir variáveis representativas da condição funcional e/ou estrutural (vibração, temperatura, pressão, etc.), com o fim de detectar anormalidades (falhas latentes), que comprometam a continuidade funcional do sistema. Estas medições são feitas em tempo real, com o equipamento em funcionamento e carga;
6. Autodiagnose trata da existência de programas especialistas de computador, capazes de diagnosticar possíveis falhas, através da análise de variáveis características de funcionamento (recebidas através de sensores em tempo real ou por coleta), indicando: localização, magnitude, causa, tempo remanescente de vida útil, etc. Esta análise é feita em tempo real de forma centralizada com o equipamento em funcionamento e carga ou

quando solicitado, através da coleta dos parâmetros vitais no local que alimentam um microcomputador descentralizado;

7. Componentes redundantes indicam a existência de mais de um componente ou sistema para a mesma função, instalada em paralelo, de forma ativa (em funcionamento) ou *stand by* (reserva) capaz de substituir, de forma imediata, o componente associado com deficiência ou pane. Esta característica, além de aumentar a confiabilidade, melhora, também, a manutenibilidade, porque evita a necessidade de intervenção de manutenção imediata e imprevista;
8. Descartabilidade refere-se à condição ou capacidade do componente ou sistema não ser reparável (descartável);
9. Características de segurança avaliam a existência de características de projeto que eliminam ou reduzem a necessidade de precauções por parte do trabalhador, objetivando evitar acidentes na atividade de manutenção. Estas características aparecem na forma de proteções, alarmes, sistemas de desligamento automático, etc;
10. Tipo de fixação/ união referem-se ao tipo e forma de fixação dos componentes através de elementos de união como parafusos, pinos de encaixe com aplique elástico ou de um giro, elementos passantes com uma ou várias voltas, trava, excêntrico, etc. Esta característica é essencial nas atividades de desmontagem e montagem;
11. Características de ajustagem e calibragem tratam da necessidade de ajustes e/ou calibragem na montagem e controle funcional, tais como: alinhamento, posicionamento, estiramento/ tensionamento, calibragem de folgas e pressões, sincronismo, etc. Exemplo de componentes com guias ou marcas para o posicionamento rápido e preciso (autoposicionáveis). Esta característica influencia as atividades de desmontagem e montagem;
12. Simplicidade estrutural/ funcional avalia a simplicidade ou complexidade do sistema quanto ao número de componentes, relação ou dependência estrutural e/ou funcional entre os mesmos, exigência cognitiva da mão-de-obra e variedade de categorias ou especialidades tratadas (mecânica, elétrica-eletrônica, hidráulica, etc.). Esta característica está relacionada com o tipo de tecnologia utilizada, habilidade e conhecimento da mão de obra, quantidade de informação a ser tratada e processada, extensão do campo visual utilizado, exigências de memorização, probabilidades de erros, quantidade de pessoas/

recursos envolvidos, entre outras. Esta característica influencia a atividade de desmontagem/ montagem e diagnóstico de falhas;

13. Acessibilidade e visibilidade avaliam a facilidade ou esforço de se chegar até um componente ou sistema com ferramentas convencionais e visualizá-lo para exercer sobre as mesmas atividades de manutenção. Esta característica pode ser um pré-requisito para satisfazer a característica de alcançabilidade e manejabilidade, além de ser um ponto importante para TPM. Influencia a atividade de desmontagem/montagem;
14. Alcançabilidade e manejabilidade avaliam a facilidade ou dificuldade para se pegar um componente ou conjunto, e manobrá-lo visando a sua colocação/posicionamento ou retirada do local de aplicação. O espaço, tamanho, peso e formas projetadas para o componente ou sistema, são decisivos para satisfazer esta característica que influencia as atividades de desmontagem/ montagem;
15. Características tribológicas atendem às necessidades de lubrificação como mancais autolubrificados, materiais resistentes ao desgaste, lubrificantes de elevada vida útil, sistemas automatizados de lubrificação, pontos para alimentação de lubrificantes agrupados, acessíveis, visíveis e identificados;
16. Característica para limpeza considera fatores como coberturas e carenagens de enclausuramento do sistema, superfícies externas de acesso livre, proteções/ anteparos para retenção de detritos/sujeira, recepção de aparas/ rejeitos do processo, vedações eficientes, etc. Estas características atendem necessidades de asseio e limpeza facilitando programas de TPM, entre outros;

- no controle da manutenção:

1. Taxa de falha (λ) determina a quantidade de falhas ocorridas num determinado período de tempo. Este índice indica uma característica intrínseca do componente/sistema quanto à tendência na ocorrência de falhas durante o seu ciclo de vida útil, determinando a frequência necessária de manutenção e o tempo médio de bom funcionamento (MTBF);
2. Tempo médio de bom funcionamento (MTBF) determina o tempo médio entre falhas;
3. Taxa de reparo ou manutenção (μ) determina a quantidade de intervenções de manutenção num período de tempo. Este valor indica a característica intrínseca do componente/sistema para facilitar o serviço de manutenção, determinando o tempo médio de reparo (MRT) necessário para executar as intervenções de manutenção;

4. Tempo médio de reparo (MRT) representa o tempo médio necessário para executar as atividades de manutenção preventivas, preditivas ou corretivas;
5. Valor estatístico de manutenibilidade $M_{(t)}$ representa a probabilidade que um sistema possui para completar uma atividade de manutenção num tempo (t) previsto;

- na condição funcional (processo):

1. Periculosidade envolve características de segurança pelo risco que oferece o tipo de equipamento, ou seja: alta tensão, explosividade, radioatividade, etc;
2. Agressividade envolve características de precaução ou alerta por condição de temperatura, corrosividade, sujeira, abrasão, etc;

- na organização:

1. Tipo de organização da manutenção, merecendo destaque os modelos de autogestão com integração sistêmica da organização, como é o caso do modelo T.P.M. (Manutenção Produtiva Total) e MRC (Manutenção de Resultado Completo);
2. O sistema de manutenção seja este corretivo, preventivo, preditivo, manutenção centrada na confiabilidade (MCC), etc; que influencia nos tempos de intervenção pela sistemática de atuação que o envolve, como por exemplo: magnitude, diagnóstico, previsibilidade da falha, complexidade, entre outras grandezas que serão diferentes em cada caso;
3. Forma de manutenção se é centralizada, descentralizada ou terceirizada;

- na mão-de-obra:

1. Fatores ergonômicos como a adaptação do serviço às exigências físicas/fisiológicas, psicológicas e cognitivas do indivíduo;
2. Fatores de preparação e habilidade profissional em que se destacam, a seleção e o treinamento;
3. Fatores de motivação considerando características do tipo qualidade da execução, interesse pelo assunto, dedicação, participação, comprometimento, etc;

- na logística:

1. Fatores de apoio/suporte como transportes, comunicação, controle automatizado da manutenção, registros e consultas de informação computadorizadas, supervisão, entre outros;

2. Fornecimento de materiais e peças sobressalentes e/ou assistência técnica dos fornecedores;
3. Instalações e condicionamento dos locais de trabalho, áreas limpas para tarefas de montagem, espaços e arranjos físicos, distâncias percorridas, disponibilidade de utilidades nas áreas de execução de serviço, entre outras necessidades;
4. Existência de ferramentas comuns e especiais, dispositivos, instrumentos e suporte para execução dos trabalhos de manutenção.

Os indicadores de manutenibilidade apresentados fazem parte do sistema de manutenção (produto/sistema, instalação, processo, organização, mão de obra, logística, meio ambiente, etc.), e devem ser considerados para o projeto destes sistemas. Estes poderão contribuir para facilitar a execução dos serviços de manutenção, possibilitando para que sejam mais baratos, com qualidade, seguros e sem riscos de agredir o meio ambiente, fazendo com que o tempo de intervenção seja mínimo e previsível. Inclusive, o atendimento a estas características, poderá diminuir e/ou eliminar a necessidade de manutenção, dependendo da argumentação técnico/ econômica.

Como se pode observar das referências anteriores, a manutenibilidade atinge também dois fatores que hoje são considerados essenciais para a sobrevivência das empresas, que são: qualidade e produtividade, os quais se consideram complementares. Na qualidade intervém quanto à exigência de disponibilidade, regularidade funcional e assistência técnica. Na produtividade, com o combate a desperdícios, dos quais a indisponibilidade produtiva e irregularidade funcional entre outros, são considerados os de maior proporção.

Todavia, a questão de manutenibilidade torna-se indispensável quando se considera o aumento da complexidade construtiva e tecnológica, cada vez maiores, nos sistemas modernos de alto desempenho. Para isto, sem a introdução deste conceito, as intervenções de manutenção tornam-se onerosas, demoradas e complexas com a qualidade dificultada. Assim, pela própria definição, a manutenibilidade, contribui também, para diminuir a complexidade dos sistemas no que tange às intervenções de manutenção.

2.2.1- Áreas de Domínio dos Indicadores de Manutenibilidade

Foram apresentadas e definidas as características de manutenibilidade que devem atender ao projeto de sistemas de manutenção, os quais serão utilizadas como indicadores de manutenibilidade. Esta apresentação deu-se em grupos pela identidade das características

vinculadas a sua especificidade (organização, mão-de-obra, logística, etc.), entretanto entende-se como necessário oferecer uma classificação por área específica de vinculação ou domínio (*cluster*), que as relaciona segundo sua contribuição no projeto, pelo tipo de atividade a ser desenvolvida na manutenção.

Assim, estes indicadores são aqui agrupados nas seguintes áreas ou *cluster*:

- Facilidade Estrutural:

- Compatibilidade de vida útil física;
- Padronização e intercambiabilidade;
- Descartabilidade;
- Modularidade;

- Facilidade de Desmontagem e Montagem:

- Tipo de Fixação/ União;
- Características de Ajustagem e Calibragem;
- Simplicidade Estrutural/ Funcional;
- Acessibilidade e Visibilidade;
- Alcançabilidade e Manejabilidade.

- Facilitação da Mão de Obra:

- Fatores Ergonômicos;
- Fatores de Preparação e Habilidade Profissional;
- Fatores de Motivação;
- Condicionamento dos Locais de Trabalho e Áreas Limpas;
- Características de segurança;
- Periculosidade;
- Agressividade.

- Facilidade na Detecção e Localização de Falhas:

- Pontos de Teste para o Diagnóstico;
- Monitoração;
- Autodiagnose;

- Componentes Redundantes.

- Facilidade de Lubrificação (Características Tribológicas):

- Mancais autolubrificandos;
- Materiais resistentes ao desgaste;
- Lubrificantes de elevada vida útil;
- Sistemas automatizados de lubrificação;
- Pontos para alimentação de lubrificante agrupados (acessíveis, visíveis e identificados).

- Facilitação Gerencial:

- Tipo de organização da manutenção (TPM, participativo, autogestão, etc.);
- Sistema de manutenção (preventivo, preditivo, holístico, MCC, etc.);
- Forma de manutenção (centralizada, descentralizada ou terceirizada);
- Taxa de falha (λ);
- Tempo médio de bom funcionamento (MTBF);
- Confiabilidade;
- Taxa de reparo ou manutenção (μ);
- Tempo médio de reparo (MRT);
- Valor de manutenibilidade $M_{(t)}$;
- Disponibilidade.

- Logística:

- Transportes;
- Comunicação;
- Controle automatizado da manutenção;
- Registros e consultas de informação computadorizada;
- Supervisão;
- Fornecimento de materiais e peças sobressalentes;
- Assistência técnica dos fornecedores;

- Instalações para manutenção;
- Ferramentas comuns e especiais, dispositivos, instrumentos, etc.

Esta apresentação por áreas específicas de vinculação ou domínio (*cluster*), oferece uma classificação que resulta útil para os casos de estudo e análise das características de manutenibilidade. Uma das aplicações desta classificação seria a avaliação qualitativa ou quantitativa das características de manutenibilidade, que exigem esta agrupação, e será utilizada neste estudo. Esta agrupação não é completa, podendo-se incluir outras como facilidade de limpeza, deixando esta última como sugestão para continuidade de trabalhos.

2.3- Ciclo de Projeto para Manutenibilidade

Para desenvolver o ciclo de projeto para manutenibilidade, é necessário abordar alguns aspectos sobre sua metodologia. Para isto escolheu-se a metodologia que vem sendo implementada pelo Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP), laboratório de pesquisa da universidade Federal de Sta. Catarina, dedicado ao projeto de sistemas mecânicos, metodologia amplamente discutida e abordada em diferentes trabalhos desta instituição como Back & Forcellini (1997); Sousa (1998), e apresentada no anexo B de forma resumida, adaptada de Matos (1999).

A metodologia de projeto mostrada no anexo B é composta por quatro fases. Cada uma destas quatro fases desenvolve estudos específicos para o projeto, abordados e explicados por Matos (1999). Pela metodologia do NeDIP (Anexo B), o modelo desenvolvido neste trabalho poderá aplicar-se na fase do projeto detalhado após o detalhamento dos elementos do sistema, para analisar e/ou orientar as características de projeto para manutenibilidade, isto por que o modelo precisa da especificação detalhada dos componentes/ conjuntos que estruturam o produto/ sistema, inclusive a vida útil dos mesmos.

Baseado nesta metodologia e assumindo conceitos do ciclo de projeto dado por Blanchard et al. (1995), que inclui a fase de projeto correspondente à manutenibilidade, apresenta-se na figura 2.2 a forma de estudo que deve ser dada ao desenvolvimento da manutenibilidade durante o projeto desde a concepção até a fabricação e teste do produto/ sistema final.

CICLO DE PROJETO INCLUINDO MANTENABILIDADE			
Desenvolvimento de projeto do Produto		Desenvolvimento da manutenibilidade	
Fase	Característica	Fase	Característica
Análise conceitual do projeto	Estudo de viabilidade do produto, características operacionais, etc.	Análise dos requisitos de manutenção	Identificação das necessidades de manutenção em função do tipo de produto /sistema
Estudo preliminar do projeto	Avaliação funcional, revisão e otimização	Determinação das características de manutenibilidade	Análise Qualitativa e quantitativa das características de manutenibilidade
Detalhamento e desenvolvimento do projeto	Detalhamento dos subsistemas e componentes, protótipo, modelagem	Detalhamento e desenvolvimento do plano de manutenibilidade	Detalhamento das características a serem introduzidas, modelagem, protótipos
Revisão e otimização do projeto	Verificação das falhas funcionais e pontos fracos de componentes /subsistemas	Revisão e otimização das características de manutenibilidade	Análise e correção das características de manutenibilidade nos componentes e subsistemas
Construção do protótipo ou primeira unidade e testes de avaliação	Verificação e controle das especificações do projeto e testes de funcionamento	Acompanhamento da construção do protótipo ou primeira unidade e testes de avaliação	Testes e avaliação da manutenibilidade durante a montagem

Fig. 2.2- Fases do ciclo de projeto de produtos/sistemas incluindo manutenibilidade.

(Adaptado de BLANCHAR et al., 1995 e MATOS, 1999).

Com isto, fica evidenciado que as atividades de desenvolvimento do projeto e de manutenibilidade são executadas de forma integrada e paralela, comprovando-se o porquê desta necessidade, já que a evolução das fases do projeto depende das especificações e detalhamento das características de manutenibilidade na sequência certa e vice-versa. Uma defasagem nesta sequência poderá onerar o custo do produto final devido a reformas, re-trabalhos e demoras do ciclo de projeto e por consequência o custo do ciclo de vida. Portanto, é mais caro e ineficiente introduzirem-se características de manutenibilidade depois do projeto pronto ou de forma defasada na sequência do ciclo apresentado na figura 2.2.

Por outro lado, a não introdução de características de manutenibilidade no produto/sistema, encarecerá o custo do ciclo de vida, conforme se verifica na expressão 2.3 e 2.4, e na figura 2.11. Para melhor compreender o conceito de custo do ciclo de vida de produtos/sistemas, apresenta-se a expressão 2.1 (ALVAREZ, 1988).

$$CCV = CDP + CDI + CE + CO + CM + CPR + CRM \quad (2.3)$$

Onde: CCV é o custo do ciclo de vida;

CDP: é o custo de depreciação do produto;

CDI: é o custo de depreciação das instalações (área, iluminação, rede de energia, etc.);

CE: é o custo de energia;

CO: é o custo de operação do produto/sistema;

CM: é o custo de manutenção do produto/sistema;

CPR: é o custo de peças e material de reposição;

CRM: é o custo de recuperação/reformas para melhorias do produto/sistema.

Para se obter o custo do ciclo de vida por hora de operação do produto/sistema, divide-se a expressão 2.3 pelo tempo de funcionamento em produção efetiva (TE), descontando-se para isto o tempo de funcionamento em vazio, de pequenas paradas e de produção de produtos /serviços reprovados.

Assim a expressão fica:

$$CCVH = \frac{CCV}{TE} = \frac{CDP + CDI + CE + CO + CM + CPR + CRM}{TE} \quad (2.4)$$

As expressões (2.3) e (2.4), comportam-se como indicadores importantes na avaliação de desempenho do sistema de manutenção, pois consegue envolver num único índice vários parâmetros de influência na eficácia, inclusive a disponibilidade de produtos/sistemas. Por esta razão é que a bibliografia nesta área (PATON, 1994; BLANCHARD et al., 1995; MIRSHAWKA e OLMEDO, 1993), costumam tomá-lo como parâmetro de referência nas metas e objetivos do sistema de manutenção (ver item E.3 e E.5, Anexo E).

Como se comentou no Capítulo 1, “a manutenibilidade é um dos fatores importantes que devem ser considerados no projeto de produtos/ sistemas” (PATTON, 1994; BLANCHARD et al., 1995). Entretanto, existem outros fatores, também importantes, que se sugere considerar, que são: Funcionalidade, Confiabilidade, Inovação tecnológica, Custo, Qualidade, Durabilidade, Eficácia, Dependência serie/ paralelo no fluxo de processo, entre outras (PATTON, 1994). Por outro lado, a manutenibilidade também interage com outras interfaces de forma sistêmica, que devem ser consideradas em nível de projeto, as quais são:

Processo/instalação, Usuário, Manutenção, Disponibilidade, Meio ambiente, Fornecedor, Fatores Humanos, Logística, entre outras (BLANCHARD et al., 1995).

Em função da abrangência e variedade de características, fatores e especificações que devem ser considerados no projeto, como já mencionado no início deste item, o projeto de manutenibilidade deve começar na fase inicial do ciclo de desenvolvimento do produto para conseguir melhor integração com todo o espectro de condicionantes. Para isto, A. K. GOVIL, (apud BLANCHARD et al., 1995), recomenda o seguinte proceder:

- 1- projetar para um mínimo de necessidades de manutenção;
- 2- projetar para o mínimo de ferramentas;
- 3- projetar para o mínimo de ajustes;
- 4- utilizar partes intercambiáveis e padronizadas;
- 5- agrupar em conjuntos e subconjuntos para que possam ser visíveis e facilmente localizados;
- 6- projetar conjuntos em módulos para reposição;
- 7- providenciar acesso para que as inspeções possam ser visuais, sem desmontagem prévia;
- 8- utilizar dispositivos indicadores de falhas e problemas, através de painéis de aviso (monitorização);
- 9- utilizar código de cores para indicar tipos de fixações;
- 10- utilizar conexões tipo *plug* ao invés de conexões soldadas ou aparafusadas;
- 11- utilizar indicadores de sobrecarga, tipo alarme, fusíveis, luminosos, etc;
- 12- projetar, considerando as condições de segurança, utilizando proteções, interruptores, etc;
- 13- prever componentes, conjuntos e subconjuntos de fácil acesso e manipulação;
- 14- fazer recuperação automática de ajustes, regulagens, *set-up* e programas em caso de falha (Controladores Lógicos Programáveis).

Neste contexto, a análise e especificação de manutenibilidade devem utilizar métodos e ferramentas de auxílio, as quais, as mais importantes, estão brevemente descritas no Anexo E.

2.4 - Métodos Utilizados para Análise da Manutenibilidade

Os métodos e ferramentas mais comuns utilizados para análise de manutenibilidade no atual estado da arte são:

- predição e medida dos parâmetros característicos de manutenibilidade, em que se especificam e/ou medem valores como taxa de falha (λ), taxa de reparo (μ), tempos média entre falha (MTEF), tempos média de manutenção (MMT), tempos média de manutenção em homem/horas por hora de operação (MMH/OH), valor estatístico de manutenibilidade $M(t)$, etc. (ver Anexos A e E, itens E.1 e E.8);
- diagramas de fluxos e blocos, como árvore de manutenção (ABNT, 1994), para analisar as necessidades e facilidades nas tarefas de manutenção. Com este método realiza-se a decomposição e descrição funcional e hierárquica das atividades de manutenção necessárias, incluindo-se alternativas para cada tarefa (ver itens E.2 e E.3, Anexo E);
- *check-list* para lembrar, orientar e selecionar requisitos de manutenibilidade, detalhamento e análise das atividades de manutenção que serão necessárias, (ver Anexo D);
- desenhos e figuras (padrões pictóricos) mostrando de forma visual o formato das características de manutenibilidade recomendadas, para serem introduzidas no projeto (Anexo F);
- modelagem gráfica, para realizar simulação e análise das características de manutenibilidade por computador (ver itens E.3 e E.4, Anexo E);
- sistemas de simulação em realidade virtual, que permitam visualizar um modelo em três dimensões e interagir com este, navegando-se através do programa de computador, simulando qualquer situação de manipulação com o modelo. (*InSys Rolls-Royce-VSEL immersion/projection text bed for virtual maintenance evaluations*, MAJOROS et al., 1997);
- ferramentas como FMECA (*Failure mode, effects, and criticality analysis*, HELMAN e ANDERY, 1995) e árvore de falhas são também, utilizadas para facilitar e identificar os possíveis caminhos de solução do problema durante o processo de análise (ver item E.2, Anexo E);
- na área militar e aeroespacial, algumas das características de manutenibilidade têm sido normalizadas, tais como: MIL-HDBK-472, "Maintenability Prediction", 1984; MIL-

STD- 471A, “Maintainability Verification, Demonstration and Evaluation”, Dec. 1978;
MIL-HDBK- 470B, “Maintainability Program for Sistem and Equipment”, Jan. 1983;

- avaliação e análise estatística do desempenho da manutenibilidade no sistema de manutenção, através de parâmetros característicos como $M(t)$, MRT, μ , disponibilidade, etc. (ver Anexo A);
- avaliação da manutenibilidade em sistemas mecânicos através de um diagrama que relaciona entre si as características de manutenibilidade com uma matriz que representa esta relação de forma combinatória, cuja solução determina um índice. Este índice determinado para diferentes alternativas de projeto, permite uma comparação relativa que poderá ser utilizada na tomada de decisão para escolha do melhor projeto. Esta matriz é conhecida como *Maintainability Facilitation Permanent Matrix* e apresentada no item 2.4.1;
- medição do tempo médio em atividades de manutenção corretiva e preventiva através de funções matemáticas. A determinação do tempo médio em atividades de manutenção corretiva avalia um conjunto padrão de características de manutenibilidade intrínsecas e extrínsecas, no sistema de manutenção utilizado para executar a tarefa de manutenção. Ambos os métodos são explicados no item 2.4.2.

Independente dos métodos e ferramentas disponíveis, a consulta a banco de dados históricos de manutenção ou experiência com produtos/sistemas similares é fundamental para auxiliar o processo de análise da manutenibilidade.

Neste ponto, percebe-se a falta de menção nas bibliografias especializadas que tratam destes métodos, o uso de cadernos de encargos ou similares para especificar requisitos de projeto (SANTOS e FIALHO, 1995). Esta ferramenta pode complementar os métodos de análise, não só pela eficácia que a mesma apresenta para especificar as características de manutenibilidade, mas também pelo fato de que este instrumento pode ser utilizado pelo usuário e pelo produtor. Pelo usuário, para a especificação das necessidades e requisitos de manutenção própria. Pelo produtor, para melhor interpretar as especificações de projeto quanto à manutenibilidade. Assim, o uso das especificações de manutenibilidade não se restringe ao pessoal de manutenção e projeto.

Os modelos ou ferramentas mencionadas são para análise, avaliação, especificação e desenvolvimento da manutenibilidade, entretanto, a condição complementar e fundamental para este estudo dá-se através da análise do custo do ciclo de vida do produto/sistema. Para

isto, analisam-se as características de mantebabilidade introduzidas no sistema de manutenção (produto, instalações, processo, mão-de-obra, logística, etc.), para verificar como influenciam este custo, que juntamente com a confiabilidade, disponibilidade e imagem de marca do produto no mercado, entre outras, é a razão final da necessidade de manutenabilidade nos produtos/sistemas.

Deve-se lembrar pela expressão 2.4, que este custo inclui todas as variáveis do sistema de manutenção utilizado, inclusive a disponibilidade do produto, através do tempo efetivo de produção TE. Nos itens E.6 e E.7 do Anexo E, mostram-se alguns programas para este fim.

Nos Anexos D, E e F são mostrados alguns modelos, programas e ferramentas utilizados para auxiliar o procedimento de análise, especificação e desenvolvimento de manutenabilidade no estágio atual do estado da arte.

Assim, o estabelecimento dos requisitos de manutenabilidade para o projeto de produtos faz-se considerando fatores de processo, confiabilidade, disponibilidade, recursos humanos, suporte logístico, custo do ciclo de vida, meio ambiente, entre outros.

Geralmente, este trabalho é realizado por profissionais da área de manutenção que trabalham em equipe com o pessoal de projeto ou cumpre a função de assessoria para a realização das fases de análise ou especificação das características de manutenabilidade (PATTON, 1994; BLANCHARD et al., 1995).

Observa-se que a maioria das metodologias de estudo e análise da manutenabilidade aqui abordadas é de base analítica com avaliação semântica (qualitativa), usando-se variáveis ou padrões lingüísticos ou pictóricos, com grande carga de avaliação subjetiva, sendo na sua maioria, de processo iterativo, em que seu sucesso depende principalmente da experiência do profissional a cargo do estudo, e de um considerável banco de dados para referências.

Neste ponto, Blanchard et al., (1995, p. 389), reconhece que estes mecanismos de análise qualitativa são limitados e não refletem todos os resultados das características de manutenabilidade sobre o sistema e seus componentes, em termos de satisfazer as especificações requeridas no projeto. Para isto, os autores alegam a necessidade de demonstração prática através de testes, como complementação do ciclo de projeto, para avaliar o desempenho da performance de manutenabilidade projetada e realizar correções para atingir os valores desejados. Estes testes serão abordados no item 2.5.

2.4.1- Avaliação da manutenibilidade através de diagrama e matriz - *Maintainability Attributes Facilitation Permanent Matrix*

Este método de avaliação da manutenibilidade é desenvolvido para sistemas mecânicos, através de um diagrama conhecido por *Graph-Teoretical Concepts* que relaciona, entre si, as características de manutenibilidade, e uma matriz que representa esta relação de forma combinatória, cuja solução determina um índice. Este índice determinado para diferentes alternativas de projeto permite uma comparação numérica relativa que poderá ser utilizada na tomada de decisão para escolha do melhor projeto. Esta matriz é conhecida como *Variable Maintainability Attributes Facilitation Permanent Matrix* (WANI, 1999).

O método consiste em representar, através de um gráfico de nó, todas as características de manutenibilidade aplicáveis ao projeto de um produto, sendo estas, previamente, bem definidas, utilizando doze características de manutenibilidade consideradas típicas em sistemas mecânicos, agrupadas segundo três famílias: projeto, mão-de-obra e suporte logístico, mostradas na figura 2.3.

A relação entre manutenibilidade e as famílias de características relacionadas, na figura 2.3, é representada como uma função matemática:

$$M = f(Ad, Ap, As)$$

onde M é o sistema de manutenibilidade;

(Ad, Ap, As); as variáveis de cada família de indicadores:

Ad = (Ad₁, Ad₂, Ad₃, . . . , Ad₈); Ap = (Ap₉, Ap₁₀); As = (As₁₁, As₁₂)

Projeto:

1. **acessibilidade:** portas com dobradiças ou prendedores deslizantes, para facilitar a visualização ou manipulação na inspeção, ajuste e reparos;
2. **desmontagem/ montagem:** tipo de fixação por soldagem, flanges, conectores, peso e tamanho do conjunto, para facilitar fixação e soltura de componentes/subconjuntos/ conjuntos ou sistemas;
3. **standardização:** uso de componentes standard com tolerâncias funcional e dimensional, para compatibilizar/ acasalar/ combinar componentes na reposição/substituição;
4. **simplicidade:** mínimo número de componentes/subconjuntos/conjuntos para simplificar o volume de atividades de manutenção;
5. **identificação:** componentes críticos devem ser identificados e marcados com etiquetas, cores, setas de direção/posição, etc, para facilitar a localização e seqüências de montagem;

6. **diagnosticabilidade:** sensores de sinal, alarme e testes embutidos no equipamento para facilitar a localização e identificação de falhas;
7. **modularidade:** montagens em blocos de unidades, contendo conjuntos de componentes associados para substituição/ reparo da unidade com pane num período de tempo mínimo;
8. **tribologia:** materiais resistentes ao desgaste, autolubrificados, lubrificantes com longa vida útil, tratamentos superficiais, camadas duras para aumentar a vida útil física dos componentes e lubrificantes;

mão-de-obra:

9. **necessidades ergonômicas:** habilidade de mão de obra para lidar com peso, tamanho, forma dos equipamentos considerando-se as exigências ergonômicas para atingir alta proficiência nas atividades de manutenção;

meio ambiente:

10. isolamento de contaminantes, sistemas à prova de vazamento, etc.

Suporte logístico:

11. **ferramentas e equipamentos de teste:** uniformizar os componentes/ conjuntos para o mínimo de ferramentas e equipamentos de suporte;
12. **documentação:** manuais apropriados para instruir e esclarecer os procedimentos de manutenção.

Fig.2.3- Família típica de características de Manutenibilidade utilizadas por Wani (1999)

Definidas as variáveis do sistema (indicadores de manutenibilidade), pode-se representar o modelo de manutenibilidade de forma gráfica em que se representa a relação recíproca entre cada variável. Esta relação é denominada grau de facilitação que pode ser ponderado segundo uma escala de avaliação de 0 a 4, (Forte = 4; Médio = 3; Fraco = 2 e inexistente = 0).

A escala utilizada para avaliar as doze características especificadas na figura 2.3 é normalizada pela MIL-HDBK-472, 1984 e apresentada no Anexo F. Entretanto, as características de Simplicidade, Tribologia e Documentação não constam nesta norma, por isso apresentadas na figura 2.4.

Simplicidade	Valor	Tribologia	Valor	Documentação	Valor
Mínimo número de componentes e não complexos	4	Componentes auto-lubrificados, resistentes ao desgaste e longa vida útil do lubrificante	4	Procedimentos e tarefas de manutenção são especificados, com <i>check-list</i> e manuais de manutenção	4
Atende a uma das condições anteriores	2	Atende a uma das condições anteriores	2	Atende a uma das condições anteriores	2
Não atende a nenhuma das condições anteriores	0	Não atende a nenhuma das condições anteriores	0	Não atende a nenhuma das condições anteriores	0

Fig. 2.4- Valores para avaliação das características: Simplicidade, tribologia e documentação.

A figura 2.5 mostra o exemplo de um modelo fictício, possuindo um determinado espectro de características de manutenibilidades representado graficamente, através do *Graph-Theoretical Concepts* (WANI, 1999). Cada nó representa uma característica de manutenibilidade e as setas de união representam a inter-relação entre variáveis em ambas direções.

1. Acessibilidade
2. Desmontagem
3. Estandarização
4. Simplicidade
5. Identificação

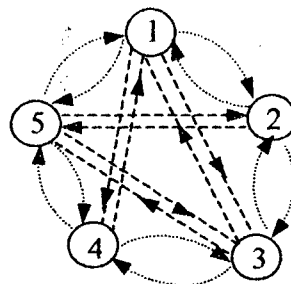


Fig. 2.5 – Modelo de representação gráfica das características de manutenibilidade *Graph-Theoretical Concepts* (WANI, 1999).

A análise da relação existente e o grau de facilitação entre características são procurados no modelo por um grupo de especialistas (manutenção, projeto, etc.), em todas as direções possíveis de cada nó representado na relação gráfica. Esta análise, para cada nó (característica V_i), gera um conjunto combinatório de relações entre as características (f_{ij}) do modelo, que são avaliadas subjetivamente de acordo com as escalas mencionadas.

A figura 2.6 mostra o resultado da análise combinatória e o valor obtido para o grau de facilitação entre características (forte, médio, fraco, inexistente), para um exemplo hipotético. Nesta tabela, cada linha representa a combinação existente de um nó da representação gráfica

(Indicador) com os restantes indicadores de manutenibilidade e nas colunas, que representam o valor do grau de facilitação, coloca-se o sub-índice que representa a característica V_i vinculada ao nó analisado.

O preenchimento desta tabela realiza-se da seguinte forma:

na primeira linha, correspondente à acessibilidade (1), avaliam-se as combinações desta característica com as outras quatro (2), (3), (4) e (5), segundo representação gráfica do modelo (figura 2.5). Quando analisada cada combinação (f_{ij}) entre duas características (V_i, V_j), coloca-se o número do sub-índice (j) que representa a característica (V_j), na célula da coluna correspondente ao valor do grau de facilitação obtido (forte= 4, médio= 3, fraco= 2, inexistente= 0). Este mesmo procedimento de análise combinatória deve ser realizado em todas as linhas da tabela, com os nós (características), do gráfico teórico da figura 2.5.

	Forte = 4	Médio = 3	Fraco = 2	Inexistente = 0
1. Acessibilidade	2	4	-	1, 3, 5
2. Desmontagem	1	4	2	3, 5
3. Estandarização	2, 3	1, 5	4	-
4. simplicidade	4	-	1, 2	3, 5
5. Identificação	2	-	4, 5	1, 3

Fig. 2.6- Relação combinatória e valor obtido do grau de facilitação entre características para um exemplo hipotético.

A inter-relação e o grau de facilitação entre características (V_i) da figura 2.6 podem ser representadas pela matriz combinatória (2.5), denominada *Variable Maintainability Attributes Facilitation Permanent Matrix* (VMAFPM).

$$\text{VMAFPM} = \begin{pmatrix} V_1 & f_{1,2} & f_{1,3} & f_{1,4} & f_{1,5} \\ f_{2,1} & V_2 & f_{2,3} & f_{2,4} & f_{2,5} \\ f_{3,1} & f_{3,2} & V_3 & f_{3,4} & f_{3,5} \\ f_{4,1} & f_{4,2} & f_{4,3} & V_4 & f_{4,5} \\ f_{5,1} & f_{5,2} & f_{5,3} & f_{5,4} & V_5 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

A diagonal representa os valores do grau de facilitação de manutenibilidade da própria característica V_i , e as variáveis (f_{ij}) representam o valor do grau facilitação da inter-relação combinatória entre características, valores estes positivos e definidos, segundo escalas mencionadas acima.

A solução desta matriz (VMAFPM) está dada por (M) segundo expressão (2.6):

$$\begin{aligned}
 M = & \Pi_{i=1}^5 V_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n (f_{ij} f_{ji}) \cdot V_k \cdot V_l \cdot V_m + \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n (f_{ij} f_{jk} f_{ki} + f_{ik} f_{kj} f_{ji}) V_l V_m + \\
 & + [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n (f_{ij} f_{ji}) (f_{kl} f_{lk}) V_m + \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n (f_{ij} f_{jk} f_{kl} f_{li} + f_{li} f_{lk} f_{kj} f_{ji}) V_m] + \\
 & + [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n (f_{ij} f_{ji}) \cdot (f_{kl} f_{lm} f_{mk} + f_{km} f_{ml} f_{lk}) + \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n (f_{ij} f_{jk} f_{kl} f_{lm} f_{mi} + f_{im} f_{ml} f_{lk} f_{kj} f_{ji})]
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

O número de termos somatórios desta expressão é $(n+1)$, onde n é o número de características do modelo arranjados em grupos na ordem decrescente. Os subíndices (i, j, k, l, m) representam as filas e colunas da matriz. Para melhor esclarecer desenvolve-se unicamente o primeiro, grupo de somatório da expressão (2.6), utilizando as variáveis da matriz (2.5):

$$\begin{aligned}
 1^o) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n (f_{ij} f_{ji}) \cdot V_k \cdot V_l \cdot V_m = & (f_{12} \cdot f_{21} \cdot V_3 \cdot V_4 \cdot V_5 + f_{23} \cdot f_{32} \cdot V_1 \cdot V_4 \cdot V_5 + \\
 & + f_{24} \cdot f_{42} \cdot V_1 \cdot V_3 \cdot V_5 + f_{31} \cdot f_{13} \cdot V_2 \cdot V_4 \cdot V_5 + f_{41} f_{14} \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot V_5 + f_{51} \cdot f_{15} \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot V_4
 \end{aligned}$$

Suponha-se determinar o índice de manutenibilidade do modelo representado na figura 2.6, e substituindo estes valores na matriz (2.5), obtendo-se a matriz (2.7), que aplicada à expressão (2.6), se obtém o resultado M.

$$\text{VMAFPM} = \begin{pmatrix} 0 & 4 & 0 & 3 & 0 \\ 4 & 2 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & 4 & 4 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 2 & 2 \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

$$M = V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot V_4 \cdot V_5 + (f_{12} \cdot f_{21} \cdot V_3 \cdot V_4 \cdot V_5 + f_{14} \cdot f_{41} \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot V_5 + f_{24} \cdot f_{42} \cdot V_1 \cdot V_3 \cdot V_5) +$$

$$(f_{12} \cdot f_{24} \cdot f_{41} \cdot V_3 \cdot V_5 + f_{14} \cdot f_{42} \cdot f_{21} \cdot V_3 \cdot V_5) = 992$$

$$M = 992$$

O resultado obtido pelo método aplicado representa um índice de manutenibilidade (I_m), que reflete o grau global de facilitação de manutenibilidade contido no sistema, através dos indicadores avaliados. Este valor passa a ter significado, se comparado a outros índices obtidos de diferentes alternativas de projeto para o mesmo sistema, desde que utilizando o mesmo espectro de características. Todavia, pode-se comparar com o índice relativo, obtido da relação (2.8):

$$I_r \% = (I_m / I_{m \text{ ideal}}) \times 100 \quad (2.8)$$

Onde: ($I_{m \text{ ideal}}$) corresponde ao maior valor da matriz, quando as variáveis (V_i) entram com o maior valor da escala (forte = 4) e as variáveis (f_{ij}) com os valores obtidos na avaliação inicial de cada projeto, que para o exemplo da tabela 2.1, o $I_{m \text{ ideal}} = 3584$.

Com esses valores, o índice relativo para este exemplo é 0,27 ($I_r = 27\%$). Desta forma, as diferentes alternativas de projeto podem ser comparadas através deste índice relativo em percentual.

Comentam-se a seguir alguns pontos de vantagens/ desvantagens e limitações deste modelo que posam justificar o ineditismo do trabalho desenvolvido nesta tese.

- a avaliação dos fatores de manutenibilidade é realizada, através de escalas padronizadas pela norma MIL-HDBK- 472, complementada por uma segunda escala criada pelo autor, com 3 níveis escalares fixos para todos os fatores (0; 2 e 4), exceto os fatores pertencentes à família de características mentais e físicas do trabalhador, medidas com 5 níveis escalares (0; 1; 2; 3 e 4). Utiliza-se, também, uma outra escala de avaliação personalizada pelo autor com 4 níveis escalares (0; 2; 3 e 4) para avaliar o grau de facilitação de manutenção envolvido na combinação entre fatores;
- As escalas generalizam em demasia a definição dos estados envolvidos em cada nível escalar e não referenciam qualquer justificativa para sua geração a não ser uma convenção normalizada;
- a avaliação dos fatores é realizada várias vezes. A primeira, considerando o valor de escala correspondente ao fator de forma isolada (v_i). As outras avaliações são realizadas,

segundo grau de facilitação apresentado por cada par de possíveis combinações entre fatores (f_{ij});

- o modelo não justifica a importância para avaliar o grau de facilitação pela combinação entre fatores de manutenibilidade;
- o modelo de representação gráfica usada, como referencial, na avaliação das características de manutenibilidade introduzidas no projeto, utiliza um espectro de fatores definidos/ normalizados, consideravelmente menor, se comparado ao universo de indicadores apresentados no item 2.2;
- o índice de manutenibilidade é obtido através da solução da matriz VMAFPM preenchida com os valores (v_i) e (f_{ij}). Esta matriz é uma ferramenta matemática generalizada, para solução de análises combinatórias, que não justifica em seu cálculo alguma relação ou peso entre fatores;
- o valor deste índice passa a ter significado, se comparado a outros índices obtidos de diferentes alternativas de projeto, para o mesmo sistema, desde que se utilize o mesmo espectro de características. Todavia, esta comparação pode ser efetuada, também, através do índice relativo (I_r);
- o índice de manutenibilidade relativo (I_r), indica o percentual de afastamento do valor ideal (fatores v_i com valores máximos de escala), mas não identifica, de maneira rápida, o caminho mais apropriado para sua melhoria, já que existem valores dos fatores individuais juntos aos valores do grau de facilitação das possíveis combinações entre fatores;
- o índice obtido restringe-se a um componente/ sub-conjunto/ conjunto (p.ex. articulação com bucha), não abrangendo o produto como um todo;
- os valores e resultados da avaliação obtidos por este modelo (V_i ; f_{ij} ; M ; I_r), dificilmente serão adequados para a rastreabilidade de pontos fortes e fracos no projeto.

O levantamento destes pontos facilitará a comparação deste modelo com o modelo objeto do trabalho de tese, que apresentam grande similaridade.

2.4.2- Métodos para predeterminar tempos nas atividades de manutenção

Entre os métodos para predeterminar tempos de atividades de manutenção se destacam os métodos para cálculo do tempo médio de manutenção corretiva e o tempo médio para a atividade de manutenção preventiva.

2.4.2.1- Método I: Cálculo do tempo médio de manutenção corretiva

Este método aplicado para determinar tempo nas atividades de manutenção corretiva utiliza uma relação de regressão empírica, proposta pelo manual militar MIL-HDBK-472, e é resultado da aplicação dos conceitos gerais de manutenibilidade em três níveis (projeto, facilidade de manutenção e habilidade da mão-de-obra). Este método foi desenvolvido, com base em experiências obtidas com produtos/sistemas estrutural e funcionalmente similar, em ambientes, também similar, adequado a atividades de manutenção corretiva (semelhantes às descritas no ciclo do Anexo C). Determina o tempo médio de intervenções de manutenção em minutos (TMI), em cada atividade específica de desmontagem e montagem, aplicada de forma individual a cada componente, conjunto ou subconjunto, segundo rotinas bem definidas e específicas, como: substituir componente i, restituir a funcionalidade do componente j em pane, etc. Esta expressão representa a correlação entre valores mínimos e máximos (0 a 4) de fatores correspondentes a atividades e ações de manutenção prevista numa tabela padronizada (*check-list*, Anexo G), para determinar o tempo médio de intervenção nos serviços de manutenção TMI (2.3). Assim, este método presume que a realização de tarefas de forma padronizada dará como resultado tempo de execução similar.

A expressão 2.9 fornece o TMI em minutos:

$$\text{TMI} = \text{Antilog. } [3,54651 - 0,02512 \times \sum_{i=1}^{i=15} A_i - 0,03055 \times \sum_{i=1}^{i=7} B_i - 0,01095 \times \sum_{i=1}^{i=10} C_i] \quad (2.9)$$

Onde: A_i é o fator de configuração física do projeto do produto, com 15 itens de avaliação (correspondentes a características intrínsecas de projeto);

B_i é o fator de facilidade de manutenção, com 7 itens de avaliação (correspondentes a características de apoio, em equipamentos externos de teste, ferramentas e equipamentos de manutenção, contato visual entre as pessoas no serviço, integração com o pessoal de operação, necessidade de pessoal técnico e assistência técnica especializada);

C_i é o fator de habilidade da mão-de-obra, com 10 itens de avaliação (correspondentes às características de esforço físico, coordenação motora e fatores de ordem cognitiva).

Todos os itens, considerados pelos três fatores, são ponderados quantitativamente (de 0 a 4) segundo análise subjetiva, sobre as variáveis lingüísticas listadas no *check-list* do Anexo F, relacionadas ao serviço analisado. A aplicação deste *check-list* pode ser auxiliada,

acompanhando-se a sequência do ciclo de atividades de manutenção corretiva do Anexo B, conjuntamente com o desenho detalhado do projeto (desenho explodido).

Para verificar limitações, vantagens e desvantagens deste modelo, utiliza-se a figura 2.7, onde se pode observar a função de valor de regressão logarítmica correspondente à expressão 2.9, que esta representada na abscissa pelo valor correspondente ao Logaritmo (TMI) ou antilogaritmo do colchete da expressão, e na ordenada pelo valor do TMI em minutos, compreendido entre o limite máximo de 3519,7 minutos (para valores nulos em todos os fatores $A_i = 0$; $B_i = 0$; $C_i = 0$, o que significa péssimas características de manutenibilidade) e o limite mínimo de 5,58 minutos (para valores máximos em todos os fatores $A_i = 4$; $B_i = 4$; $C_i = 4$, o que significa as melhores características de manutenibilidade).

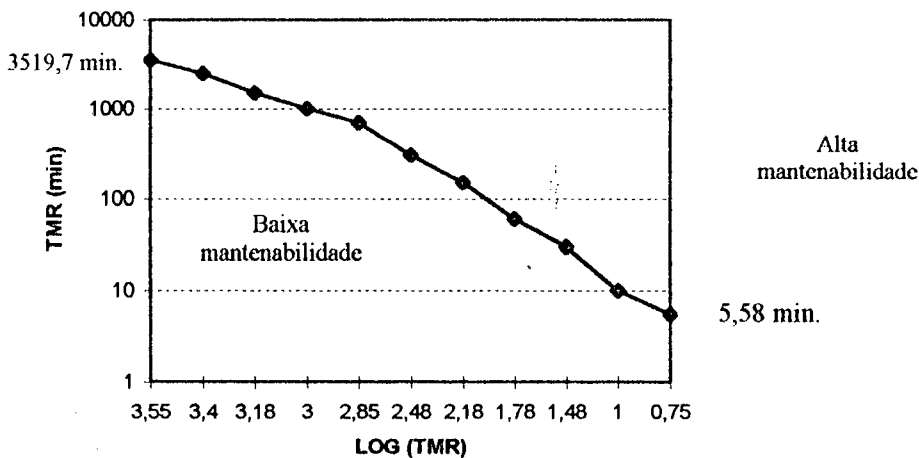


Fig. 2.7- Função de regressão logarítmica da expressão 2.9.

Outra particularidade a ser observada nesta função de valor é que se excetuando os pontos de TMI máximo (3519,7 minutos) e mínimo (5,58 minutos), qualquer outro valor de TMI, pode ser obtido otimizando-se os valores das variáveis A_i , B_i e C_i , balanceando-os entre seus valores mínimos e máximos (0 e 4), em função das diferentes opções de manutenibilidade oferecidas, segundo o *check-list* do Anexo F, com a condição de que o resultado final do colchete da expressão 2.9, seja de valor único para o ponto analisado. Isto mostra que em projeto para manutenibilidade de produtos/sistemas, sempre se têm várias opções, e elas devem ser procuradas para o menor custo de ciclo de vida do produto.

2.4.2.2- Método II: Método para determinar o tempo de atividades de manutenção preventiva

Este método é formulado para atividades de manutenção preventiva, utilizando a expressão 2.10, que determina o tempo médio total em horas (TMP) para cada milhão de

horas de operação, considerando-se para isto todas as atividades de manutenção preventiva necessárias em cada componente, conjunto ou subconjunto do produto/sistema, segundo rotinas bem definidas e específicas, como: verificar folga no componente (i), ajustar ou calibrar o conjunto (j) para o valor correspondente (x), limpar ou substituir filtro y, etc. (BLANCHARD, et al., 1995).

$$TMP = \frac{\sum f_i \times tmp_i}{\sum f} \quad (2.10)$$

Onde: f é a frequência de manutenção preventiva dada em número de atividades executadas por cada milhão de horas de operação;

tmp_i representa o tempo médio em horas de cada atividade de manutenção preventiva. Este tempo médio é determinado com base em dados históricos ou pela aplicação de tempos padrão ou sintéticos tabelados.

Existem outros métodos para cálculo de tempos de manutenção, baseados na aplicação de tempos padrão (banco de dados) ou sintéticos (tabelados), entretanto para serem aplicados, o ciclo de atividades de manutenção precisa ser previamente desmembrado em tarefas menores ou elementares como: pegar ferramenta, colocar ferramenta, girar ferramenta, extrair componente, etc.

As vantagens, desvantagens e limitações deste método de avaliação de manutenibilidade podem ser assim resumidas:

- os valores de frequência (f) são determinados para um milhão de horas de operação do sistema, que em trabalho ininterrupto corresponde a uma vida útil de 114 anos;
- os valores médios de tempo de manutenção preventiva são determinados estatisticamente através de históricos, tempos padrões entre outros, cuja precisão dependerá da manutenibilidade do sistema;
- a utilização deste tempo global médio de manutenção preventiva para uma vida útil de 114 anos serviria para determinar o custo do ciclo de vida, ciclo este não comum a sistemas funcionais atuais onde a vida útil média varia entre 5 anos para equipamentos moveis, 10 anos para equipamentos fixos e 20 a 30 anos para estruturas.

Foram apresentados alguns métodos de análise de manutenibilidade, entretanto este último método não avalia diretamente a manutenibilidade, mas os resultados obtidos dependem destas características no projeto do sistema.

2.4.3- Processo de Análise de Manutenibilidade

No processo de análise de manutenibilidade devem ser distinguidas duas categorias: análise para projeto de novos produtos/ sistemas e análise para reforma/ reprojeto de produtos/ sistemas existentes.

2.4.3.1- Análise de Manutenibilidade para Projeto de Novos Produtos/ Sistemas

O processo desta análise (segundo recomendações de BLANCHARD et al., 1995) se realiza em nove fases como mostra a figura 2.8.

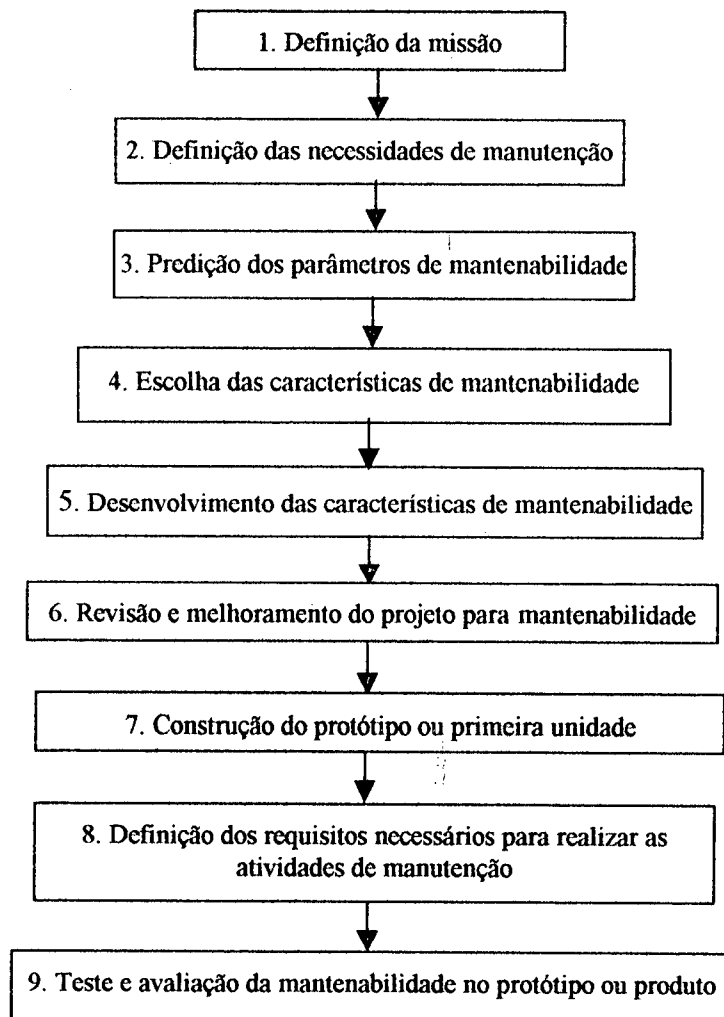


Fig. 2.8- Fases para análise, desenvolvimento e teste da manutenibilidade em novos produtos/sistemas (BLANCHARD et al., 1995).

1- A primeira fase inicia-se pela definição da missão que terá o produto/sistema a ser projetado. A definição de missão deve conter:

- necessidades do usuário;

- performances e parâmetros funcionais;
- ambiente de instalação;
- região geográfica da instalação;
- vida útil física;
- sistema de manutenção a ser aplicado;
- fatores de eficácia da produção;
- fatores de eficácia da manutenção;
- sistema reparável ou descartável, total ou parcial.

2- A segunda fase continua com o levantamento das necessidades de manutenção/conservação em função das características construtivas e funcionais do produto/sistema. Estas necessidades referem-se, basicamente, à lubrificação, ajustes, inspeção, substituição de componentes no fim de vida útil, limpeza, entre outras necessidades de conservação. Para isto, o projeto é analisado em nível de sistema, subsistema e componente, verificando-se: função, ambiente, tecnologia utilizada, recursos disponíveis do usuário para as atividades de manutenção, complexidade, condição de reparabilidade ou descartabilidade, modo e efeito da falha, riscos de segurança (confiabilidade), custo, entre outras características. Para a realização desta fase, pode-se utilizar as seguintes etapas:

- obtenção de dados básicos como taxas de falha (λ), taxas de reparo (μ), fator de forma (β) e (γ) da função distribuição de Weibull, tempos médios de bom funcionamento (MTBF), tempos médios de manutenção ou reparo (MRT), entre outros (ver Anexo A);
- determinação da criticidade (análise de risco), utilizando-se ferramentas como FEA (Failure Effect Analysis), FMEA (Failure Mode Effect Analysis) e FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) (HELMAN e ANDERY, 1995), (ver item E.2, Anexo E). Nesta fase determinar-se-ão as frequências de manutenção que dependerão da taxa de falha (λ), vida útil, qualidade de fabricação, qualidade de operação e manutenção, características de desgaste, influências do processo e meio ambiente, confiabilidade desejada, cuidados no transporte, requisitos de instalação e iniciação do funcionamento (amaciamento), etc;
- determinação da árvore de falha e árvore de manutenção, obtida através da análise de falha de cada componente, conjunto, subconjunto e sistema; considerando-se inclusive sua dependência funcional e/ou estrutural (série-paralelo). Deste estudo sairão as necessidades de desmontagem e montagem para substituição de componentes;

- determinação dos itens reparáveis e não reparáveis;
- determinação das necessidades de ajuste e calibração;
- estabelecimento das necessidades de monitoração das condições operacionais, funcionais e de falha;
- estabelecimento das necessidades de testes e inspeção;
- estabelecimento das necessidades de lubrificação e limpeza;
- definição das tarefas de manutenção preventiva e preditiva;
- definição das necessidades de habilidade da mão-de-obra para operação e manutenção;
- estabelecimento de itens e níveis de estoque de peças e materiais de reposição;
- estabelecimento das necessidades de ferramentas (comuns e especiais), dispositivos, equipamentos e instalações para manutenção;
- definição das necessidades de suporte e recursos logísticos (comunicação, computação, transportes, assistência técnica especializada, etc.);
- definição das características dos manuais de operação/manutenção, *troubleshoot*ing, desenhos, circuitos e assistência técnica.
- estabelecimento da hierarquia de prioridades de manutenção em componentes, conjuntos e subconjuntos em função dos dados obtidos anteriormente, considerando-se para isto o desempenho dos elementos em termos de desgaste e vida útil. Esta listagem será utilizada para desenvolver a terceira fase.

Para esta segunda fase, em particular, sugere-se como instrumento de auxílio o uso de cadernos de encargos (SANTOS e FIALHO, 1995) para recomendar, especificar e/ou detalhar as necessidades de manutenção. No Anexo E, item E.2 e E.3, sugerem-se algumas ferramentas para esta atividade;

3- A terceira fase consiste em prever ou especificar os valores de manutenibilidade (MRT, μ , β e γ , MMH/ OH – Tempos médios de manutenção em homem-hora por hora de operação, etc.) e disponibilidade. Estes valores, que fazem parte das especificações do projeto e constituem o ponto chave para referência e avaliação de desempenho do projeto, são fixados em função de estudo de mercado, exigências do consumidor, melhoramento e otimização de performances em produtos/sistemas de modelos de mercado, etc., focalizando-se, para isto, o objetivo final, que são a disponibilidade e o custo do ciclo de vida do produto/sistema. Para

especificar estes valores, deve-se realizar a predição ou fixação de parâmetros de manutenibilidade através de métodos específicos (Anexo E), e realizados na fase inicial de projeto, como mostra o quadro 2.1, pois os mesmos norteiam e balizam as atividades de definição e desenvolvimento da manutenibilidade. As técnicas, procedimentos ou metodologias para se realizar a predição destes parâmetros dependem do tipo de equipamento, tipo de componente, conjunto ou subconjunto, tipo de atividade de manutenção a ser desenvolvida, precisão desejada, dados disponíveis, entre outros.

A fonte principal para se basear esta predição, está na análise de tarefas resultante da lista de necessidades de manutenção realizadas na fase 2, com sua hierarquia de prioridades correspondente, segundo análise de criticidade. Assim, deve-se estabelecer os valores de manutenibilidade para cada atividade de manutenção correspondente a cada componente, conjunto, subconjunto e sistema. Para determinar alguns destes parâmetros como tempos de manutenção, destacam-se os dois métodos apresentados no item 2.4.2;

4- A quarta fase consiste na definição das características de manutenibilidade (indicadores) a serem introduzidas no projeto, em função das atividades de manutenção analisadas e deficiências na fase 2 (considerando os pontos de baixo desempenho) e a predição de parâmetros de manutenibilidade da fase 3. No Anexo E, itens E.1 e E.8, mostram-se ferramentas de auxílio para esta atividade.

5- A quinta fase continua com o desenvolvimento estrutural das características recomendadas na fase 4. Neste ponto se exploram: idéias, tecnologias disponíveis, modelos/produtos existentes, criatividade e experiência entre outros recursos, para satisfazerem os requisitos e características de projeto. O Anexo F ilustra algumas sugestões para o projeto de características de manutenibilidade;

6- A sexta fase contém a revisão e o melhoramento do projeto, e consiste em verificar a adequação das características de manutenibilidade desenvolvidas, no contexto geral, para atender às especificações do projeto. Para esta verificação poderão ser utilizados pré-testes, *mockups*, protótipos, modelos reduzidos, modelagem por computador, etc. Nesta revisão, realizam-se as melhoras e reformas necessárias a serem introduzidas. É neste ponto que se exige a maior integração das equipes de projeto, manutenção, fabricação e eventualmente o usuário. Esta fase inclui os seguintes passos de análise (BLANCHARD et al., 1995):

- análise das características construtivas;
- análise das características funcionais;

- análise das características operacionais;
- análise das características de confiabilidade;
- análise das características de manutenibilidade;
- análise dos itens de materiais, peças e componentes necessários à construção;
- análise para as exigências de fabricação;
- análise de valor total ou parcial;
- análise para as exigências de transporte e instalação;

7- A sétima fase corresponde à construção do projeto em protótipo ou primeira unidade. Segundo Blanchard et al. (1995), esta fase é da maior importância, pois se aproveitam as atividades de montagem e desmontagem que geralmente exigem as atividades de construção de protótipos ou novos produtos/sistemas para verificar, analisar e medir o desempenho das características de manutenibilidade projetadas, resultando assim num pré-teste;

8- A oitava fase consiste em definir, de forma padrão, os requisitos e recursos necessários para desenvolver as atividades de manutenção. Isto porque o desempenho das características de manutenibilidade (e eventuais condições de segurança) não depende unicamente dos fatores intrínsecos introduzidos no projeto do produto/sistema, devendo-se considerar também, todas as características intrínsecas e extrínsecas de manutenibilidade e condições que envolvem a atividade de manutenção de forma holística ou sistêmica, como a própria definição de manutenibilidade sugere, e que está formada por: produto/sistema, processo, instalação, mão-de-obra, organização, logística, ambiente, etc.;

9- A nona e última fase consiste no teste de avaliação de desempenho das características de manutenibilidade no produto/sistema. Nesta fase, medem-se os tempos de manutenção (MRT) e necessidades de recursos em estrutura de organização, habilidade e quantidade de mão-de-obra, ferramentas, instalações para manutenção, peças de reposição, logística, segurança e custos do serviço. Em síntese, nesta fase verificam-se as facilidades e dificuldades que o projeto do produto/sistema oferece para as atividades de manutenção. Pela importância desta fase, no item 2.5 aborda-se com maiores detalhes esta questão de teste do produto.

Foram abordadas as formas de análise de projeto de novos produtos (BLANCHARD et al., 1995) e a seguir apresenta-se a análise recomendada para projetos de produtos existentes ou reformas.

2.4.3.2- Análise da Manutenibilidade na Reforma de Produtos/Sistemas Existentes

O processo de análise da manutenibilidade para produtos existentes se diferencia do anterior em alguns pontos por que a existência do produto permite uma análise local de forma física, e se estiver em funcionamento, existe a possibilidade de acesso a um registro de dados históricos, ou pelo menos ao relato da vivência dos usuários com o produto/sistema.

Isto modifica em parte o enfoque de análise mostrado no item anterior, resultando um processo de oito fases descritas na figura 2.9. Comparando-se a figura 2.8, o que se modifica neste novo esquema é a fase 3 de predição dos parâmetros de manutenibilidade que se prescinde pela existência de registros históricos do produto em utilização e da fase 7 que é substituída no novo enfoque pela fase 6 com a realização das reformas para melhoramento do projeto. As restantes fases continuam de forma similar, que por apresentar algumas particularidades são reapresentadas.

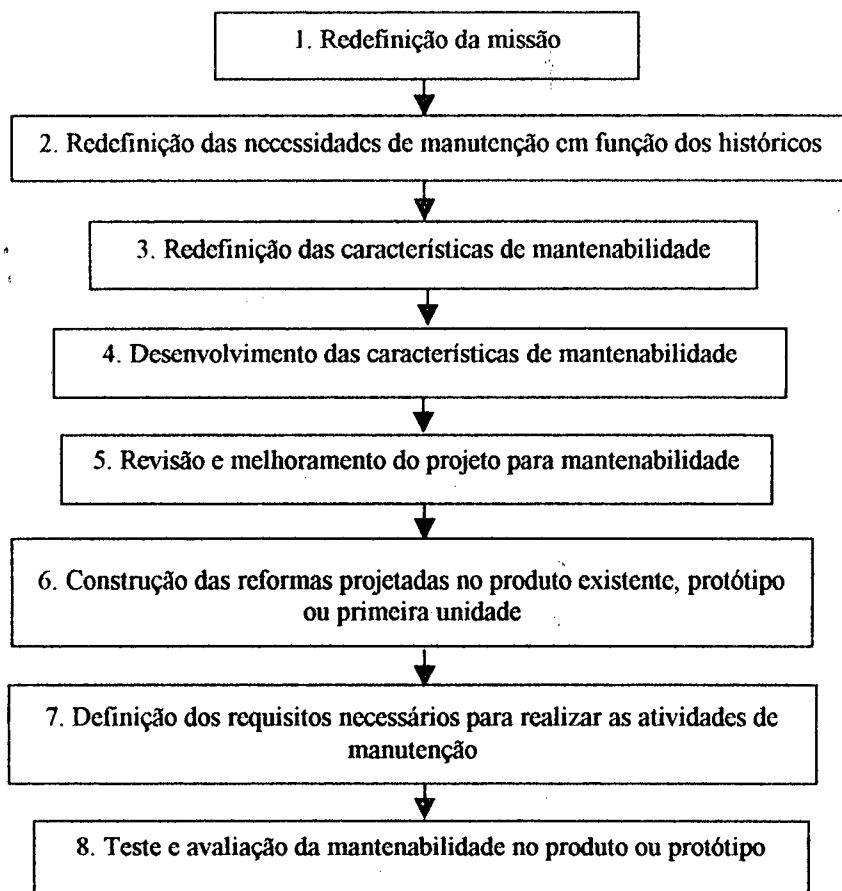


Fig. 2.9- Fases para análise e desenvolvimento da manutenibilidade na reforma de produtos/sistemas existentes.

1- A primeira fase consta da redefinição da missão, isto se existir uma falta de adequação do produto/sistema projetado à missão realmente destinada. Para isto se realiza o mesmo processo da primeira fase indicada no item 2.4.3.1, porém realimentado pelo banco de dados de registros históricos ou experiências disponíveis.

2- Na fase 2, para realizar o levantamento das necessidades de manutenção exigidas pelo produto/sistema, se analisam as tarefas de manutenção que são/eram executadas, verificando-se os pontos fracos do projeto, para estas atividades, através do banco de registros históricos existentes, em termos de taxa de falha (λ), tempo médio de bom funcionamento (MTBF), taxa de manutenção (μ), tempo médio de reparo (MRT), tempo médio de manutenção corretiva (MTBMu), custo de manutenção corretiva (CMC), tempo médio de manutenção preventiva (MTBMs), custo de manutenção preventiva/preditiva (CMP), frequências de manutenção preventiva/ preditiva, necessidades de peças e materiais em estoque, recursos em mão-de-obra (habilidade e quantidade), ferramentas, logística, etc.

Com esta análise, pode-se detectar itens com maior incidência de falhas, maiores tempos de manutenção, maiores custos, exigências do processo e ambiente, exigências do sistema de manutenção (produto/sistema, instalação, organização, mão-de-obra, logística, etc.), adequação das frequências de inspeção/manutenção, entre outras. Isto permitirá visualizar os melhoramentos e reforços necessários que serão introduzidos no projeto.

3- A terceira fase busca redefinir as características de manutenibilidade necessárias, tendo como base a análise resultante da fase 2 e as características de manutenibilidade existentes no projeto atual.

4- A quarta fase corresponde ao desenvolvimento e projeto das características definidas na fase anterior, de forma semelhante ao descrito no item 2.4.3.1, porém com a vantagem de existir um protótipo (produto atual) para referência, teste e visualização física.

5- A quinta fase continua sendo revisão e melhoramento das fases anteriores, mas com intensidade menor que a exigida em produtos/sistemas novos, já que a reformulação se realiza em função do produto existente.

6- A sexta fase corresponde à construção das reformas projetadas no produto/sistema existente, protótipo ou primeira unidade, onde materiais e peças poderão ser reaproveitados para reduzir os custos de melhoramento e reforma.

7- A sétima fase consiste em definir, de forma padrão, os requisitos e recursos necessários para desenvolver as atividades de manutenção de forma idêntica à realizada na fase 8 do item 2.4.3.1. Os registros históricos do equipamento reforçarão a realização desta fase.

8- A oitava fase corresponde aos testes e avaliação de desempenho do produto/sistema reformado nas atividades de manutenção em termos de manutenibilidade, que será idêntica à realizada na fase 9 do item 2.4.3.1.

Pelo exposto, verifica-se que o processo de análise de manutenibilidade mostrado neste item é facilitado, quando comparado com o processo de análise de produtos/sistemas novos. Entretanto, lembra-se que o custo final de melhoramento e reforma da manutenibilidade em produtos/sistema existentes é substancialmente maior que quando desenvolvido conjuntamente com o projeto original, como mostra a figura 2.2.

2.5- Teste de Avaliação da Manutenibilidade em produtos/sistemas

Esta etapa consiste em verificar se as características de manutenibilidade desenvolvidas no projeto, atende às especificações impostas na fase do projeto. Para isto, na fase 3 do ciclo de análise de projeto (figura 2.2), foram preestabelecidas como metas as especificações iniciais ou valores de referência de manutenibilidade, tais como: tempo médio de manutenção ou reparo (MRT), taxas de manutenção ou reparo (μ), custo de manutenção, entre outras.

É evidente que o resultado obtido por qualquer método apresentado na descrição da fase 3, figura 2.8 (item 2.4.3.1), será estocástico e, como tal, os mesmos devem sofrer um tratamento estatístico para atingir a representatividade desejada. Para procurar esta representatividade, será necessário definir o tamanho da amostra ou quantidade de testes a serem realizados. Para isto pode-se utilizar a expressão 2.11, que determina o tamanho da amostra (N) de forma aleatória (BLANCHARD et al., 1995):

$$N = [C_x \cdot Z / K]^2 \quad (2.11)$$

Onde C_x é o coeficiente de variação calculado por: $C_x = \sigma / M'$, onde σ (desvio padrão do tempo de manutenção, o qual pode ser estimado) e M' (valor médio do tempo de manutenção obtido através de históricos ou métodos de predição mencionados);

Z: Nível de confiança em percentagem (geralmente 95%);

K: Precisão desejada em percentagem do desvio padrão (variando de 2 a 30%).

Poderão ser utilizados outros métodos estatísticos para cálculo do tamanho da amostra, encontrados em bibliografias especializadas, entretanto, por razões de tempo e custo sugere-se para este trabalho, utilizar-se um pequeno número de amostras, com tratamento estatístico, através da expressão de Weibull, que tem a principal característica, entre outras, de trabalhar com amostras de pequeno número. Por exemplo, Nelson (1982), Bergamo (1997), entre outros, sugerem cinco amostras como tamanho mínimo.

Após a predição ou fixação dos valores de manutenibilidade e a determinação do tamanho da amostra, resta executar o teste de avaliação para verificar se os parâmetros impostos nas especificações são atingidos. Para isto, deve-se realizar o teste de avaliação com a própria atividade de manutenção, à qual se referem os indicadores de manutenibilidade que estão sendo avaliados, simulando-se o defeito ou necessidade de manutenção sobre um *mockup*, protótipo ou primeira unidade produzida.

Pela fase 8 da figura 2.8, as atividades de manutenção executadas devem obedecer a requisitos e recursos predefinidos ou padronizados para sua execução, aos quais o usuário deverá obedecer, para garantir o desempenho esperado. Estas tarefas podem ser baseadas no ciclo geral de atividades de manutenção corretiva indicado no Anexo C, ou especificamente para este trabalho, ao ciclo de desmontagem/ montagem para atividades de manutenção, que pode ser auxiliado através da árvore de manutenção (NBR 5462, 1994). Por sua vez Sousa (1998), descreve amplamente as características da montabilidade de sistemas apresentando métodos de análise e avaliação.

Por outro lado, o verdadeiro teste de avaliação de desempenho é o que considera todas as características reais, condições típicas de operação/manutenção e ambientes utilizados pelo usuário, por isto a necessidade de definir os requisitos e procedimentos padrões, para se executarem as atividades de manutenção (fase 8, figura 2.8 e fase 7 figura 2.9).

Assim, os requisitos necessários para o teste de avaliação deverão ser previstos durante a evolução das diferentes fases de projeto, isto porque alguns testes preliminares poderão ser realizados durante estas fases, utilizando-se recursos analíticos através de simulação em modelos por computador ou práticos, através de análises de laboratórios, utilizando-se para isto modelos, *mock-ups* ou protótipos em escala real ou reduzida. Alguns destes métodos e ferramentas utilizadas para este propósito são citadas no Anexo E.

Assim, a execução da fase de teste exige um planejamento prévio que se inicia com o próprio desenvolvimento do projeto indicado na figura 2.2. Este planejamento define:

- tipo de teste a ser realizado (pré-testes, simulação analítica ou em laboratório, durante ou após a fabricação, em operação, etc.);
- condições e requisitos do teste que incluem descrição e procedimentos de teste como ambiente, local, suprimentos de utilidades, mão de obra (quantidade e habilidade), procedimentos de manutenção, suporte e apoio logístico, etc;
- itens a serem testados como componentes/ conjuntos e subconjuntos onde sua seleção obedece a uma hierarquia pelo grau crítico, dado pela frequência, tempo ou custo de manutenção;
- quantidade de testes a serem realizados, aplicando-se a expressão 2.11 ou outros métodos específicos;
- momento para a realização do teste, segundo o ciclo de projeto da figura 2.2;
- recursos necessários como mão-de-obra, ferramentas, equipamentos, software, etc;
- características e variáveis a serem medidas com os correspondentes valores de referências obtidos através dos métodos de predição de manutenibilidade (acessibilidade, alcançabilidade, manobrabilidade, visibilidade, facilidades de manutenção, tempos, taxas, frequências, custo, etc.).

Os testes realizados podem não satisfazer totalmente às necessidades de avaliação de desempenho, porém delimitam satisfatoriamente e de forma antecipada como se comportarão as características de manutenibilidade no produto final, fornecendo informações suficientes para evitarem-se futuras mudanças e re-projeto com a conseqüente redução de custos.

Como já foi mencionado, alguns dos testes exigidos para desmontagem/ montagem, poderão ser realizados durante a fase de construção do protótipo ou primeira unidade, conseguindo-se desta maneira um pré-teste ou teste com menor custo e redução de tempo.

Segundo Blanchard et al. (1995), o teste formal de avaliação poderá ser executado em três fases, a saber:

- 1) Teste formal na fase de controle final do produto. Este teste é realizado após a construção do protótipo ou primeira unidade, podendo incluir:
 - avaliação do ambiente em termos de temperatura, vibração, umidade e agentes agressores em geral;
 - avaliação de performances operacionais (carga, velocidade, etc.);

- avaliação da confiabilidade em termos de (MTBF) e (λ);
- avaliação da manutenibilidade em termos de facilidade e tempos característicos de manutenção como MRT, $M(t)$, tipo de distribuição β , taxa de reparo μ , entre outros;
- avaliação das características de habilidade da mão-de-obra e procedimentos de manutenção;
- avaliação das exigências em ferramentas, equipamentos e instalações de manutenção;
- avaliação das exigências de suporte logístico, entre outros;

2) Teste formal na fase de demonstração do produto. Este teste é realizado para o usuário em ambiente e condições reais de uso, podendo-se utilizar as instalações do mesmo, incluindo sua própria mão-de-obra. Este teste pode incluir a avaliação de várias características de manutenibilidade, além do próprio produto/sistema, como: estrutura organizacional, habilidade de mão de obra, instalações, ferramentas, equipamentos e procedimentos para manutenção, suporte logístico, segurança, custo, entre outros;

3) Teste formal na fase de operação inicial do produto/sistema. Este teste é realizado após a instalação do produto/sistema nas instalações do usuário, durante e após a iniciação operacional do sistema. Geralmente, este tipo de teste cobre um período considerável de tempo e poderá ser contínuo, durante todo o ciclo de vida útil do sistema, principalmente quando se trata de lançamento de novos produtos, para detectar todo o espectro de problemas potenciais que o projeto contenha em termos de manutenibilidade. Este método de teste é muito comum em aeronaves.

Estes dois últimos tipos de teste oferecem maior realidade às condições de avaliação, pois atuam nas condições específicas do usuário.

Após a avaliação como resultado dos testes, poder-se-ão conduzir as modificações necessárias do projeto, para melhorar seu desempenho, visando alcançar as especificações desejadas. Inclusive, tem-se comentado no item 2.3, que esta fase de teste é parte complementar no ciclo de projeto, principalmente, quando o método utilizado para análise, definição e desenvolvimento das características de manutenibilidade é do tipo analítico.

Apesar do método proposto por este trabalho, para análise e definição das características de manutenibilidade, ser menos analítico, não quer dizer que venha a eliminar a necessidade de teste de avaliação, mas pretende-se que, pelo menos, reduzirá as necessidades de modificações e melhorias após o projeto. Isto, porque a nova metodologia está baseada na

avaliação escalar dos indicadores de manutenibilidade (parcial e global), o que presume maior precisão para a escolha, comparação e determinação das mesmas. Esta redução nos esforços de testes de desempenho do produto nas atividades de manutenção e/ou diminuição do re-projeto, seria mais uma contribuição deste trabalho, com a conseqüente redução do custo e tempo de projeto.

Como comentado anteriormente, os resultados obtidos na fase de teste como TR e MTR, precisam ser avaliados e analisados, através de metodologias para definir o desempenho das características de manutenibilidade projetada, o que levará à aprovação ou necessidade de modificações do projeto. Estas metodologias são variadas e algumas apresentadas em Blanchard et al., (1995). Entretanto, para este trabalho sugere-se a utilização da própria definição estatística de manutenibilidade, mostrada no item 2.2, segundo expressão 2.2.

Com isto, com os valores (TR) obtidos nos testes, calcula-se o valor de $M(t)$ (probabilidade de que $T_{ms} \leq t$), devendo-se definir qual o valor de probabilidade aceitável, que neste trabalho propõe-se o valor inicial de 0,90 (90%), por ser um valor de probabilidade elevado na estimação de tempos para manutenção, comparada a padrões práticos convencionais, entretanto referências destes valores não são comumente divulgadas. Outros valores complementares, também são calculados, a partir dos resultados de testes como: fator de forma (β), taxa de reparo (μ) e coeficiente de correlação (R) (ver Anexo A).

A proposta do método estatístico para avaliação dos valores (TR) obtidos nos testes de desmontagem/montagem, justifica-se porque como já mencionado no Capítulo 1, verifica-se que a definição estatística de manutenibilidade, também funciona como instrumento de avaliação de desempenho das características projetadas, já que os valores obtidos com sua expressão $M(t)$, representam uma magnitude estatística, medida em termos de probabilidade do tempo de manutenção atingido nas paradas programadas, fortemente influenciada pelos indicadores de manutenibilidade.

Do resultado das análises descritas, surgem as necessidades de modificação do projeto, que por sua vez devem incluir, também, uma análise comparativa com todas as possíveis alternativas de melhoramento, focalizando a integração do sistema de manutenção, pois as mudanças de projeto no produto poderão ser substituídas por reforços em outras características extrínsecas de manutenibilidade que influenciam o produto de forma sistêmica, tais como: organização, processo, mão-de-obra, instalação, ferramentas, logística, etc;

verificando-se com isto a viabilidade técnica e econômica, com o mesmo desempenho do produto em termos de manutenibilidade, diminuindo-se o custo do produto e conseqüentemente o custo do ciclo de vida.

2.6- Sistemas de Apoio/ Suporte Logístico para Manutenção – *Supportability*

Suportabilidade é a tradução mais adequada que foi encontrada neste trabalho para a palavra em inglês *Supportability*, já que ainda não foi convencionada uma tradução na língua portuguesa, por ser um tema muito recente.

Neste capítulo, se faz menção da necessidade de se tratar a manutenibilidade de forma holística dentro do sistema de manutenção formado por organização, processo, produto/sistema, mão de obra, logística, meio ambiente, etc. Assim, o conceito de *Supportability* é um dos mais importantes deste sistema, principalmente no que tange ao apoio das atividades de manutenção.

Knezevic (apud CARTER, 1999), define *Supportability* como característica inerente de produtos/sistemas, segundo sua capacidade para demandar necessidades de recursos de apoio logístico (quantidade e habilidade de mão-de-obra, ferramentas e dispositivos, equipamentos para diagnoses e testes, transportes, comunicação, informática, peças sobressalentes, apoio de especialistas, etc.), na execução de determinadas atividades/ tarefas de manutenção.

O mesmo autor expressa *Supportability*, quantitativamente, através do tempo adicional que uma tarefa de manutenção leva por causa de esperas na falta de qualquer item de suporte (apoio). Assim, o tempo de espera (T_e) ocasionado é função de fatores organizacionais, política de investimento, localização geográfica, meio ambiente, treinamento de pessoal, estrutura logística, entre outros.

De forma similar à definição de manutenibilidade, pode-se também, definir o conceito de *Supportability* como a probabilidade para que um sistema de apoio logístico (suporte) que auxilia uma tarefa de manutenção específica com um nível de suporte predefinido propicia a realização desta tarefa dentro do período de tempo estimado (CARTER, 1999), ou seja:

$$S_{(t)} = \text{Prob} (T_s < T_E)$$

Onde: T_s é o tempo de serviço pleno, que pode ser escrito: $T_s = T_R + T_e$

T_E é o tempo de serviço estimado;

TR é o tempo de reparo;

Te é o tempo de espera;

Os métodos de tratamento para determinação e predição destes parâmetros serão os mesmos utilizados para manutenibilidade.

Com estas colocações, pode-se esclarecer melhor o conceito de coeficiente de reparabilidade visto no item 2.2, expressão 2.1; que agora pode ser escrito como:

$$Cr = \frac{MRT}{MRT + Tme}$$

Onde: MRT é a média do tempo de reparo;

Tme é o tempo médio de espera.

Em síntese, o que se procura com a consideração do conceito de *Supportability* no projeto de produtos/sistemas é que o (Tme) seja mínimo ou zero, em função do melhor compromisso técnico e econômico, em que para sua especificação utilizam-se dois importantes critérios que são o risco e o valor econômico inerentes ao sistema de suporte a ser formatado.

Assim, procura-se estabelecer o máximo auxílio/suporte com o mínimo custo. Para isto será necessário aplicar três atividades distintas, porém inter-relacionadas (CARTER, 1999):

- determinar a confiabilidade e manutenibilidade do produto/sistema;
- determinar a projeção do custo de ciclo de vida;
- determinar e analisar o suporte logístico requerido.

A figura 2.10 mostra a *Supportability* e Manutenibilidade dentro do contexto de características de um produto/sistema.

Nesta figura, observa-se que a manutenibilidade é uma característica da medida de *Supportability*, e que a demanda de suporte, também dependerá das características de manutenibilidade, incluídas no projeto do produto/sistema, aumentando ou diminuindo em função destas. Assim *Supportability* é uma característica extrínseca da manutenibilidade.

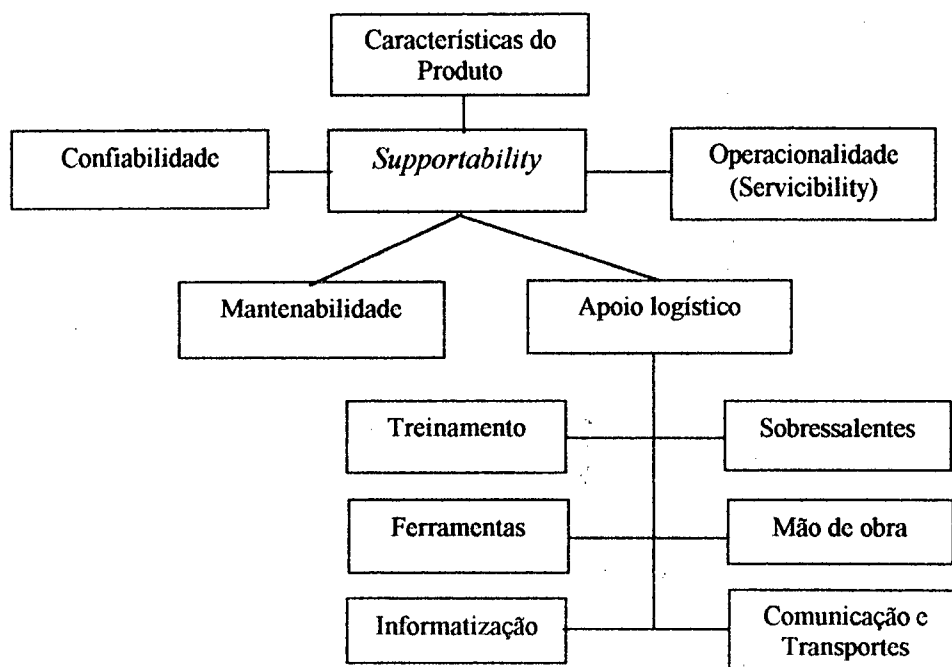


Fig. 2.10- Suportabilidade como característica de um produto/sistema no contexto do sistema de manutenção (CARTER, 1999).

Com isto, entende-se a necessidade de considerar e definir o sistema de suporte juntamente com a atividade de projeto da manutenibilidade em produtos/sistemas, pois tanto a *Supportability* influencia a manutenibilidade, como sua relação inversa.

2.7 - Ferramentas Especiais como Auxílio e/ou Complemento a Características de Manutenibilidade

Ferramentas especiais utilizadas nas atividades de manutenção não fazem parte das características de manutenibilidade, mas contribuem para complementar algumas dessas características, das quais as mais importantes estão no auxílio à acessibilidade, visibilidade e manobrabilidade, facilitando as atividades de desmontagem e montagem, ou até evitando esta necessidade em algumas tarefas de manutenção (ALVAREZ e POSSAMAI, 2000).

A importância deste tema está em que se as ferramentas especiais podem ser consideradas como auxílio ou complemento a características de manutenibilidade, a análise realizada para verificar-se a viabilidade técnico-econômica, para incorporação destas características no projeto de produtos/sistemas, terão que incluir esta alternativa.

Especificamente, a incorporação no projeto de características como acessibilidade, visibilidade e manobrabilidade (características estas mais relacionadas a ferramentas especiais), poderão ser substituídas por alguns tipos destas ferramentas, segundo opção mais viável. Isto acontece, principalmente, em produtos/sistemas compactos, que procuram redução generalizada de volumes e pesos ou para obedecer a compromissos de *designer*, como no caso específico de automóveis.

Inclusive (como pode ser visto nos exemplos apresentados no Anexo H), muitas delas têm a função específica de evitar a necessidade de desmontagem parcial ou total de componentes, subconjuntos ou conjuntos do produto/sistema em tarefas de manutenção (como, por exemplo, encurtar correntes de transmissão).

Entretanto, a complementação das características de manutenibilidade, através de ferramentas especiais, não terá sempre como resultado uma eficiência igual à alcançada com as próprias características. A redução de eficiência que esta opção geralmente acarreta merece ser estudada e, por isto, é aqui colocada como mais um tema para continuidade de estudo.

Os critérios para escolha de ferramentas especiais estão direcionados para o melhoramento do desempenho das tarefas de manutenção com redução de tempos, esforços físicos e cognitivos, aumento da qualidade, segurança nos serviços e a conseqüente vantagem de economia de custos. Uma outra função importante que cumprem as ferramentas especiais é a de evitar danos nos componentes durante as atividades de desmontagem e montagem como, por exemplo, a extração e colocação de rolamentos e retentores.

O setor que mais desenvolve e utiliza este tipo de ferramenta é sem dúvida a linha automotiva, e sua demanda se dá em duas frentes:

- em nível de montadoras, que desenvolvem seus próprios tipos de ferramenta para atender às necessidades da linha de montagem da fábrica e dos serviços de manutenção nas concessionárias;
- em nível de mercado, em que atuam, de forma independente, as montadoras, atendendo a oficinas automotivas, em geral, para as quais através da pesquisa de necessidades de mercado, fabricantes desenvolvem ferramentas especiais de uso específico, segundo marcas e modelos de automóveis.

É interessante observar que pesquisas para detectar as necessidades de mercado neste tipo de ferramentas, é feito considerando-se dois fatores básicos que são a acessibilidade do

componente/sistema a ser desmontado/montado e a frequência de manutenção exigida pelo mesmo, pois quanto maior esta última, sua demanda também será maior.

Em nível de projeto para manutenibilidade, estas ferramentas devem ser previstas durante o ciclo de projeto do produto/sistema, no qual a padronização e minimização destas devem ser observadas. Estas ferramentas podem ser classificadas como:

- ferramentas para facilitar o acesso às atividades de soltura ou aperto de elementos de união. As figuras H.1 a H.7 do Anexo H mostram algumas destas ferramentas;
- ferramentas para facilitar a visualização. A figura H.8 do Anexo H mostra alguns destes acessórios;
- ferramentas para facilitar a extração, remoção ou colocação de componentes. A figura H.9 do Anexo H mostra alguma destas ferramentas;
- ferramentas para facilitar o posicionamento, ajuste ou calibração de componentes, subconjuntos ou conjuntos. A figura H.10 do Anexo H mostra alguma destas ferramentas;
- ferramentas ou acessórios para facilitar o posicionamento do trabalhador de manutenção (ALVAREZ, 1997). A figura H.11 do Anexo H mostra alguns destes dispositivos e posicionadores ergonômicos, estes últimos pesquisados por ALVAREZ e POSSAMAI, (2000).

Existem outros tipos de ferramentas e acessórios, mas por serem especiais são estudados e projetados para solução de casos em atividades de manutenção específica, objetivando complementar e/ou auxiliar características de manutenibilidade. Inclusive, para este fim muitos usuários desenvolvem e projetam suas próprias ferramentas em função das necessidades locais.

2.8- Análise de Custo para Incorporação de Características de Manutenibilidade

Neste item serão abordados métodos de análise para avaliar o custo de incorporação das características de manutenibilidade no projeto de produtos/sistemas. A figura 2.11 mostra a relação entre valores de manutenibilidade, custo de incorporação e o custo do ciclo de vida. Claro (1977), apresenta a forma matemática para obter as curvas da figura 2.11 e sua equalização, em função de um tratamento estatístico das variáveis.

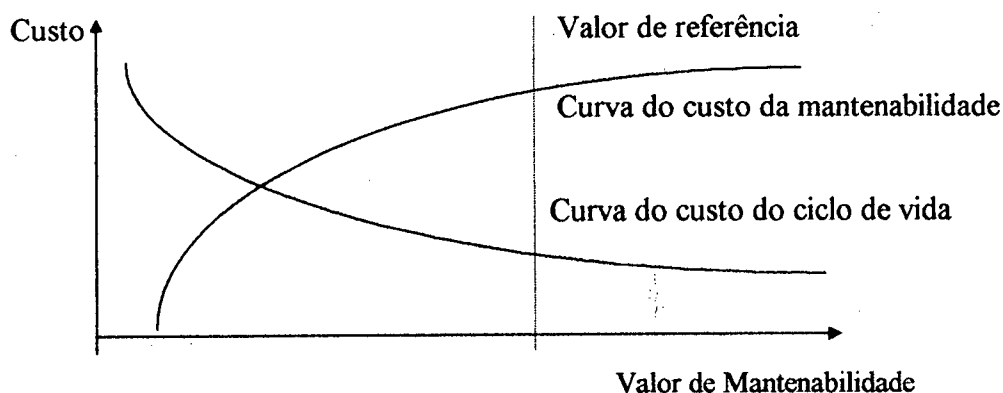


Fig. 2.11: Relação entre o valor de manutenibilidade, custo de incorporação e custo do ciclo de vida (BLANCHARD et al., 1995).

O custo é considerado o fator principal para avaliação de alternativas de projeto, assim na figura 2.11, observa-se como o custo aumenta com a incorporação de características de manutenibilidade. Por outro lado, à medida que aumentam estas características, diminui o custo do ciclo de vida útil (ver expressão 2.3 e 2.4).

Neste sentido, também deve ser observado que o custo de incorporação de manutenibilidade é um investimento pontual, no início do ciclo de vida, já o custo do ciclo de vida é durante todo seu período de vida. Esta consideração é importante e deve ser levada em conta na avaliação de alternativas, pois investimentos devem ser avaliados em função de custos-benefícios resultantes durante todo o ciclo de vida útil do produto.

A análise dos custos de incorporação de valores de manutenibilidade versus benefícios auferidos (com MRT, $M(t)$, disponibilidade e custo de ciclo de vida) é uma forma de verificar a viabilidade técnico-econômica da manutenibilidade incorporada no produto/sistema. Para isto, neste item aborda-se uma metodologia de análise para o custo de incorporação da manutenibilidade. Este custo deve ser tratado na forma de estimativa, pois o projeto do produto/sistema ainda será construído.

Um custo estimado é uma opinião ou resultado de um julgamento concernente a uma expectativa subjetiva sobre um custo futuro que acontecerá com a aquisição/ fabricação de um produto.

O processo para a estimativa de custos depende de:

- conhecimento das partes construtivas que constituem o produto;

- conhecimento do ciclo do processo para a obtenção do item e/ou suas partes. Isto permitirá determinar parâmetros como horas/homem, horas/máquina, unidades por hora, etc;
- conhecimento dos materiais necessários para a obtenção do item e/ou suas partes;
- conhecimento de fatores, taxas, valores padrões ou específicos (analógicos, paramétricos, estatísticos, regressões, empíricos, etc.) para o processo de cálculo, como: pesos específicos, custos de hora-homem, horas-homem / unidade de uma variável, custo/unidade de uma variável, etc;
- métodos ou ferramentas utilizadas para o processo de cálculo;
- experiência do analista.

Desta forma, o analista ou calculista de custo segue um processo lógico, sequenciado passo a passo e auxiliado por ferramentas como: folhas de memória de cálculo, banco de dados com fórmulas, fatores, taxas e valores padrões ou específicos, tabelas/ gráficos, software específicos (ver item 3 do Anexo E), entre outros recursos para se chegar até o valor final do custo estimado. Este custo, todavia, para revisão, pode ser comparado a outros valores de referências, como custos históricos ou itens similares padronizados de mercado.

Independente da metodologia e ferramentas de cálculo, o valor estimado de um custo é determinado invariavelmente por quatro variáveis que são: material utilizado, tempo de mão-de-obra, tempo de máquina e/ou processo e lucro do fornecedor (às vezes deve ser incluída a estas variáveis o custo de projeto e/ou desenho, transporte e taxas de imposto, juros ou descontos). Assim, a precisão do custo estimado está na quantificação correta de cada uma destas variáveis, já que o custo unitário delas em geral é facilmente conhecido.

Como o que interessa é o custo estimado para a incorporação de um determinado projeto de manutenibilidade, o cálculo deve ser realizado sobre o custo de obtenção dessa característica específica. Para isto, o processo deve ser desenvolvido considerando-se unicamente o valor agregado da diferença entre o projeto do produto/sistema com e sem a característica de manutenibilidade avaliada, ou seja, o valor de custo da característica introduzida no projeto com a consideração da manutenibilidade. Este valor assim obtido é utilizado para analisar as diferentes alternativas de manutenibilidade do projeto de um produto.

2.9- Possíveis Ramos de Estudo da Manutenibilidade

A figura 2.12 mostra os possíveis ramos de estudo da manutenibilidade, selecionado em negrito o ramo que se pretende abordar neste trabalho, ou seja, avaliação de indicadores de manutenibilidade destinados a atividades de desmontagem e montagem para manutenção e sua representação através de índices.

Os outros ramos mostrados na figura 2.12 complementam o chamado sistema de manutenção formado por produto/ sistema, instalação, processo, mão-de-obra, logística, organização, ambiente, etc.

Conforme mencionado anteriormente, a importância de escolher-se o ramo indicado para o estudo (desmontagem/ montagem), está no fato de querer contribuir com o esclarecimento dos mecanismos de projeto da manutenibilidade que permitem aumentar a disponibilidade e regularidade operacional, bem como diminuir os custos do ciclo de vida dos sistemas produtivos, reduzindo os trabalhos improdutivos nas atividades de manutenção e, assim, reduzir tempos de reparo e custos.

O esclarecimento destes mecanismos deve permitir uma melhor identificação das necessidades de manutenção para poder especificar projetos de produtos/ sistemas com características de manutenibilidade que facilitem esta atividade e contribuir para que estas especificações não se limitem a descrições semânticas (qualitativas), podendo-se, também, quantificá-las de forma escalar.

Na atualidade, produtos/sistemas (principalmente do setor industrial), não satisfazem exigências básicas de condicionamento para atividades de manutenção, seja em tempos médios de bom funcionamento (MTBF), taxa de falhas (λ), tempos médios de reparo (MRT), cumprimento dos prazos de paradas programadas $M(t)$, taxa de reparo (μ), entre outros parâmetros importantes de desempenho para manutenção. Estas exigências obrigam os usuários a investir para melhorias do projeto, sem o ressarcimento por parte dos fabricantes.

Quanto à procura de disponibilidade, observa-se que esta necessidade é cada vez mais prioritária nas ações empresariais, visto que a tendência mundial é de se estender às atividades de serviços (supermercados, lojas de departamentos, inclusive pequenas lojas) durante três turnos, executando-se jornadas de vinte e quatro horas ao dia, sete dias na semana. Esta tendência evidencia a importância da disponibilidade de produtos/sistemas aplicados a atividades de negócios.

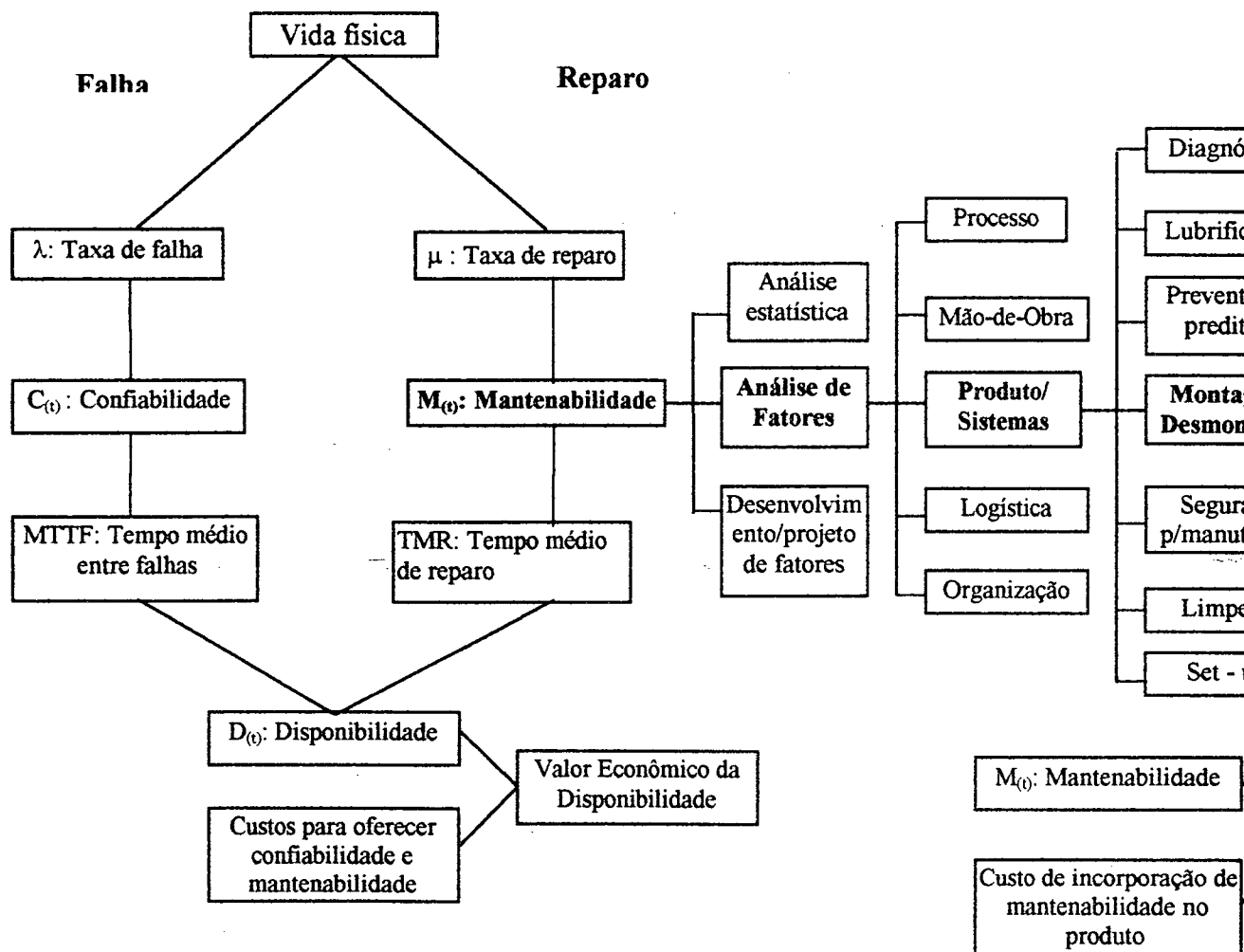


Fig. 2.12- Ramos de estudos da manutenibilidade enfocando a disponibilidade.

Para melhor justificar a pretensão deste estudo, apresentam-se os seguintes índices (valores médios) da área de manutenção em nível nacional e internacional (alguns já apresentados no item 2.1):

- 50% da carga de trabalho dos operários nas atividades de manutenção de emergência ou corretivas, são gastos com atividades não produtivas do tipo deslocamentos, procura de orientação e ferramentas, procura de avarias, etc. (índice internacional, PATTON, 1994);
- a eficiência operacional global média é de 50% (calculada como produto das taxas de disponibilidade dos sistemas de produção, eficiência de velocidade dos mesmos e aproveitamento de produtos/serviços realizados) (índice internacional, NAKAJIMA, 1989);
- 60 a 75% do custo de ciclo de vida útil de produtos/sistemas são gastos com operação e manutenção (índice internacional, PATTON, 1994);
- 28% do custo final de produção são gastos com operação e manutenção (índice internacional, PATTON, 1994);
- 8,62% da mão de obra de manutenção desenvolvem atividades de melhoria em produtos/sistemas (índice nacional, ABRAMAN, 1990);
- 19,9% do total de funcionários da empresa correspondem à área de manutenção (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- 34,2% do total de funcionários da manutenção correspondem ao pessoal contratado esporadicamente na manutenção (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- 54,31% do pessoal da manutenção executam tarefas de multiespecialização e 56% das empresas, utilizam funcionários polivalentes (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- 15,5% do pessoal de operação/produção participam na realização de pequenos reparos na manutenção (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- 4,21% do faturamento bruto da empresa correspondem a custos de manutenção. Isto corresponde a aproximadamente 30 bilhões de dólares por ano (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- 35,46% dos custos de manutenção são gastos com pessoal e 33,92% com materiais (índice nacional, ABRAMAN, 1997);

- 25,53% dos serviços de manutenção são corretivos e 28,75% de manutenção preventiva (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- 85,82% foi a disponibilidade operacional geral, como consequência do desempenho de todos os setores da empresa (índice nacional, ABRAMAN 1997);
- 4,74% foi a indisponibilidade operacional, devido unicamente à manutenção (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- 53,04% dos produtos/sistemas instalados correspondem à faixa de 11 a 20 anos de idade média de uso (índice nacional, ABRAMAN, 1997);
- a evolução dos custos da manutenção no Brasil na década de 1991 a 1999 (% Custo manutenção/ Custo Faturamento Bruto), mostra tendência de declínio segundo figura 2.13.

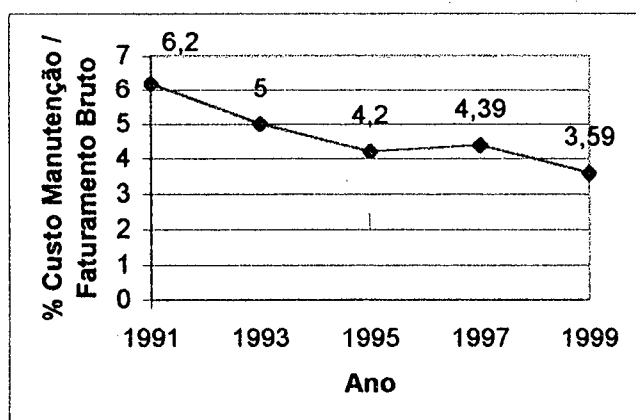


Fig. 2.13- Evolução dos custos da manutenção no Brasil na década de 1991 a 1999 segundo % Custo manutenção/Custo Faturamento Bruto.
Referência: (MANUTENÇÃO, Revista No 80, p. 23, 2001).

Em síntese, este trabalho visa fornecer auxílio para o estudo e tratamento da manutenabilidade, no projeto de novos produtos/sistemas ou reforma dos existentes, nas atividades de desmontagem e montagem para manutenção. Todavia, as informações e resultados apresentados poderão ser úteis para outros estudos sobre manutenabilidade, principalmente nos ramos da figura 2.12.

Neste Capítulo apresentou-se a fundamentação teórica da manutenabilidade, No Capítulo seguinte serão descritas as ferramentas que serão utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

CAPÍTULO 3 – FERRAMENTAS A SEREM UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Neste capítulo descreve-se o ferramental a ser utilizado no desenvolvimento do modelo, com descrição sucinta das metodologias utilizadas na solução de problemas que envolvem decisões com multicritérios. Coloca-se também, a justificativa para a escolha entre os possíveis métodos existentes, em função dos condicionantes do problema a ser resolvido. Procura-se também, identificar os métodos e ferramentas aplicadas na solução de problemas de manutenibilidade, no estágio atual. Mostra-se como a metodologia de Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) deve ser aplicada, passo a passo, no desenvolvimento de um trabalho, e de que maneira esta ferramenta contribui na solução do problema em estudo.

3.1- Justificativa para a escolha do método

A justificativa para a escolha dos métodos e ferramentas de auxílio a serem utilizados no desenvolvimento deste trabalho, está baseada nos seguintes pontos condicionantes do problema a ser resolvido (BANA E COSTA et al., 1995):

- permitir trabalhar com variáveis lingüísticas;
- detectar e permitir analisar e especificar variáveis e indicadores que representem o problema;
- converter avaliações semânticas em cardinais;
- interpretar juízos de valor subjetivos;
- construir funções de valor cardinais, a partir de variáveis lingüísticas com juízos de valor semântico;
- permitir a construção de um modelo que facilite sua utilização por qualquer usuário, que, no mínimo, conheça em detalhe o problema a ser resolvido;
- que o modelo construído, através desta metodologia, auxilie os usuários/atores na compreensão e aprendizado do uso para a solução de problemas (fácil interpretação e aplicação);
- permitir a agregação (soma) de valores parciais (locais) para se obterem valores globais;

- trabalhar com margens de erros aceitáveis, em torno de 10% (ENSSLIN, 1998);
- permitir ajustes de afinação que se fizerem necessários para tornar os resultados obtidos o mais representativo possível da condição real, e;
- que ofereça auxílio, via computação, para desenvolvimento do trabalho.

Os pontos listados anteriormente foram considerados condicionantes e essenciais para a escolha dos métodos e ferramentas a serem utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

3.2- Escolha da Metodologia a ser Utilizada no Desenvolvimento do Modelo

A busca por metodologias multicritério, visando resolver o problema proposto neste trabalho, esta baseada nos seguintes aspectos apresentados pelas mesmas:

- conseguem abordar diferentes tipos de informações do tipo quantitativo, qualitativo e semântico;
- auxiliam a estruturação do problema, melhorando a compreensão das variáveis envolvidas, e;
- fazem com que os usuários/atores reflitam sobre seus objetivos, prioridades e preferências (sistemas de valores).

Em função das correntes de pensamento e do tipo de abordagem e perspectiva dada pela comunidade científica ao estudo de Metodologias de Multicritérios e diante das várias metodologias existentes, destacam-se duas escolas básicas neste campo de estudo: as escolas Americana e Européia. Cada uma influenciada por diferentes ambientes culturais, sem interação direta e evoluídas da tradicional Pesquisa Operacional (PO) para resolver problemas, envolvendo multicritérios com variáveis qualitativas e quantitativas. Esta é uma diferença básica com a PO, que procura otimizar uma única alternativa (monocritério) com variáveis exclusivamente quantitativas (BANA E COSTA et al., 1995).

Quanto a características metodológicas entre as escolas, pode-se destacar que a européia enfatiza o aspecto de auxílio aos usuários/atores envolvidos, objetivando a compreensão e o aprendizado em busca da melhor solução do problema. Por sua vez, a escola americana enfatiza a “tomada de decisão” *per se*, objetivando a busca da solução ótima dentro dos multicritérios. Independente desta distinção entre escolas cabe mencionar que a escola

européia, também se engaja na tentativa de desenvolver modelos, procurando a solução ótima (BANA E COSTA apud DUTRA, 1998).

Estas duas formas de abordagem na solução de problemas com multicritérios sintetizam as duas correntes básicas que são: *Multicriteria Desicion Making* (MCDM) e *Multicriteria Desicion Aid* (MCDA).

3.2.1- Principais Características do MCDM - Escola Americana

As características do modelo MCDM inserem-se no arcabouço teórico da PO tradicional, na qual identificam-se as seguintes (DUTRA, 1998):

- existe um conjunto A , de alternativas viáveis α , bem definido. Não há distinção em relação ao modelo tradicional de PO;
- um problema só é declarado corretamente se for definido por um único critério (função de valor única V) definido no conjunto A , representando corretamente as preferências do decisor D , que por sua vez poderão sofrer complementação;
- as complementações que podem sofrer as preferências do decisor, que possui em mente um modelo de preferências bem definido, devem conter as seguintes propriedades:
 - a relação binária P (definida em A) possui propriedades assimétrica e transitiva (ver BANA E COSTA et al., 1995);
 - a relação binária I (definida em A) possui propriedade reflexiva, simétrica e transitiva (ver ENSSLIN, 1998);
 - um decisor D fundamentará seu julgamento com respeito à comparação de duas alternativas α' e α , com base em um conjunto de descritores;
 - ao comparar duas alternativas α' e α , o decisor D deve escolher sem qualquer ambigüidade, uma e apenas uma delas, segundo uma relação binária I (indiferença) ou P (preferência estrita) entre as possibilidades;
 - conseqüentemente, existe uma função de valor V (ou função de utilidade), definida em A , de tal forma que:

$$\alpha' P \alpha \text{ se } V(\alpha') > V(\alpha),$$

$$\alpha' \text{ I } \alpha \text{ se } V(\alpha') = V(\alpha).$$

- num problema matemático bem formulado (como no modelo tradicional de PO), existe a busca de uma solução ótima, ou seja, a descoberta de uma alternativa ótima α' em A , onde α' deve satisfazer:

$$V(\alpha') \geq V(\alpha) \quad \forall \alpha \in A$$

Em função das características apresentadas por esta escola, pode-se observar que:

- ♦ o novo fato que ocorre em MCDM com respeito à PO é que o critério V não pode ser a priori e sim um dado explicitamente conhecido;
- ♦ na abstração do modelo, percebe-se nitidamente a presença de objetividade.

Abordou-se um resumo que mostra como as características da escola Americana estão inseridas no perfil de PO. Veja-se a seguir as características da escola Européia.

3.2.2- Principais Características do MCDA - Escola Européia

Para melhor compreender as características do modelo MCDA, é necessário frisar que no ambiente em que se desenvolve este modelo, não existe necessidade da noção pura de objetividade, pois se considera que este enfoque possui limitações, reconhecendo-se e aceitando-se a presença da subjetividade.

Portanto, a explanação das características deste modelo será realizada confrontando-as com o modelo MCDM. Assim:

- enquanto a abordagem MCDM prega a existência de um conjunto A bem definido, o modelo MCDA coloca que a fronteira de A é difusa e poderá ser modificada ao longo do processo decisório. Neste sentido, a determinação de alternativas viáveis α envolve certa arbitrariedade;
- enquanto a abordagem MCDM prega a existência de um decisor D , o modelo MCDA coloca que, em problemas reais, o decisor D não existe, pois quem toma parte no processo decisório são todos os envolvidos no problema, ou seja, os atores, que podem estar representados por vários decisores, por grupos de influência (também chamados de

stakeholders), ou por grupos de intervenientes (que podem ser especialistas em áreas do problema);

- enquanto a abordagem MCDM prega a existência de um modelo de preferência bem definido na mente de um decisor D , o modelo MCDA estabelece que as preferências são raramente bem definidas, uma vez que existe incerteza, conhecimento parcial da situação ou problema, conflito ou contradições em suas preferências;
- enquanto a abordagem MCDM baseia-se em não ambigüidade dos dados, no modelo MCDA assume-se que os dados são em muitos casos imprecisos e/ou definidos de uma maneira arbitrária. Por exemplo, valores numéricos da performance das taxas de substituição (K_j), para agregação aditiva dos valores $g_j(a)$, no valor global $V_k(a)$;
- enquanto a abordagem MCDM prega a existência de uma solução ótima para um problema matemático bem formulado, o modelo MCDA coloca que em geral é difícil ou impossível determinar se uma decisão é boa ou ruim, baseando-se apenas num modelo matemático, uma vez que aspectos culturais, pedagógicos e situacionais afetam a qualidade e sucesso da decisão.

As colocações referidas anteriormente justificam o reconhecimento dos limites da objetividade e a presença da subjetividade na abordagem do modelo MCDA. Todavia, o contexto deste modelo pode ser sintetizado em três características básicas e principais:

- existe um conjunto A , porém como sua fronteira é difusa, não existem necessariamente alternativas potenciais a estáveis. Neste contexto, passam a existir ações potenciais e não alternativas, uma vez que as alternativas são mutuamente exclusivas, o que não ocorre com as ações potenciais;
- a comparação entre duas ações potenciais é feita com base nos indicadores de impacto destas ações que, por sua vez, foram construídos com base em uma família F de critérios;
- o problema é mal definido matematicamente, uma vez que vários aspectos qualitativos, tais como sociais e pedagógicos, interferem na decisão. Assim, os modelos desenvolvidos por esta abordagem, têm por objetivo gerar conhecimento aos atores, para que as decisões futuramente tomadas estejam em conformidade com a meta do decisor. Ou seja, construir a solução melhor adequada ao problema.

A figura 3.1 apresenta uma comparação com as diferenças mais marcantes entre os modelos MCDM e MCDA, apreciadas por este trabalho.

Escola Européia	Escola Americana
Reconhecimento da presença e necessidade de integração, tanto dos elementos de natureza objetiva como os de natureza subjetiva	Reconhecimento apenas dos elementos de natureza objetiva
O principal objetivo é construir ou criar algo (atores e facilitadores em conjunto) que por definição, não preexistia completamente	O principal objetivo é descobrir ou descrever algo que, por definição, preexiste completamente
Busca entender um axioma particular, no sentido de saber o seu significado e o seu papel na elaboração de recomendações	Busca analisar um axioma particular, no sentido de levar a uma verdade através de normas prescritas
Ajudar a entender o comportamento do tomador de decisão, trazendo para ele argumentos capazes de fortalecer ou enfraquecer suas próprias convicções	Não existe a preocupação de fazer com que o tomador de decisão compreenda o seu problema, apenas que explicite as suas preferências

Fig. 3.1- Comparação das diferenças básicas entre as Escolas Européia e Americana.

Após a compreensão e análise da metodologia utilizada por cada escola e focalizando os quesitos necessários, colocados como condicionantes (item 3.1), para desenvolver o modelo proposto neste trabalho, detectou-se como mais apropriado o método MCDA, por cumprir de maneira mais satisfatória com os quesitos necessários à solução deste problema. A metodologia MCDA será descrita neste capítulo.

3.3- Ferramentas e métodos utilizados no estágio atual do estado da arte da manutenibilidade

Os métodos e ferramentas utilizadas atualmente para resolver problemas ligados à manutenibilidade foram apresentados no item 2.4, e novamente aqui apresentados de forma resumida:

- predição e medida dos parâmetros característicos de manutenibilidade, em que se especificam e/ou medem valores como taxa de falha (λ), taxa de reparo (μ), tempos média entre falha (MTBF), tempos média de manutenção (MTM), tempos média de manutenção por hora de operação (MMH/OH), etc. (ver Anexos A e E itens 1 e 8);

- diagramas de fluxos e blocos, para analisar as necessidades e facilidades nas tarefas de manutenção. Com este método realiza-se a decomposição e descrição funcional e hierárquica das atividades de manutenção necessárias, incluindo-se alternativas para cada tarefa (ver itens E.2 e E.3, Anexo E);
- listas padrões (*check-list*), para verificar o cumprimento de recomendações de características de manutenibilidade no projeto de produtos/sistemas (Anexo D);
- desenhos e figuras (padrões pictóricos) mostrando de forma visual o formato das características de manutenibilidade recomendadas, para serem introduzidas no projeto (Anexo F);
- modelagem gráfica, para realizar simulação e análise das características de manutenibilidade por computador (ver itens E.3 e E.4, Anexo E);
- sistemas de simulação em realidade virtual, que permitam visualizar um modelo em três dimensões e interagir com este, navegando-se através do programa de computador, simulando qualquer situação de manipulação com o modelo. (*InSys Rolls-Royce – VSEL immersion/projection text bed for virtual maintenance evaluations*);
- ferramentas como FMECA (*Failure mode, effects, and criticality analysis*) e árvore de falhas são também utilizadas para facilitar e identificar os possíveis caminhos de solução do problema durante o processo de análise (ver item E.2, Anexo E);
- na área militar e aeroespacial, algumas das características de manutenibilidade têm sido normalizadas, tais como: MIL-HDBK- 472, MIL-HDBK- 470B, MIL- STD- 471A, “*Maintainability Verification, Demonstration and Evaluation*”, Dec. 78.);
- avaliação e análise do desempenho da manutenibilidade no sistema de manutenção, através de parâmetros característicos como $M_{(t)}$, MTR, μ , disponibilidade, etc. (ver Anexo A);
- avaliação da manutenibilidade em sistemas mecânicos através de um diagrama que relaciona entre si as características de manutenibilidade e uma matriz que representa esta relação de forma combinatória, cuja solução determina um índice. Este índice determinado para diferentes alternativas de projeto permite uma comparação relativa que poderá ser utilizada na tomada de decisão para escolha do melhor projeto. Esta matriz é

conhecida como *Maintainability Facilitation Permanent Matrix* e apresentada no item 2.4.1;

- a função de valor representada pela expressão 2.9 (item 2.4.2.1), para determinar o tempo médio de intervenção (TMI) em atividades de manutenção corretivas, entre outros.

Recomenda-se uma atenção especial na observação destes dois últimos métodos, pois os mesmos possuem certas características similares ao modelo que será desenvolvido neste trabalho, com vistas à análise dos indicadores de manutenibilidade em projeto de produtos/sistemas, nas atividades de desmontagem e montagem em manutenção.

3.4- O Método MCDA - Multicritério de Apoio à Decisão

Na pesquisa, visando-se a escolha da metodologia mais adequada a ser empregada no desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho, procurou-se determinar aquele que melhor permitisse detectar, especificar, analisar as características de manutenibilidade, para depois determinar funções de valor que representem de forma quantitativa estes indicadores. Ou seja, das variáveis lingüísticas representadas por estas características, obter-se uma ponderação numérica de sua avaliação semântica. Assim, pela descrição e justificativa explicitada nos itens 3.1 e 3.2, decidiu-se pelo método de análise Multicritério de Apoio à Decisão - MCDA (*Multiple-Criteria Decision Aid*).

Reiterando o já colocado anteriormente, este método da Escola Européia é uma ferramenta utilizada para auxiliar processos de apoio à decisão em:

- ações complexas com múltiplas alternativas e múltiplos decisores;
- para justificar a racionalidade de uma decisão;
- para gerenciar informações complexas baseadas em numerosos fatores e critérios, entre outras.

Assim, este método permite determinar, analisar e avaliar todas as variáveis que intervêm numa ação ou problema, construindo um modelo representativo das preferências e valores dos decisores. Em síntese, permite a construção de um modelo de avaliação com base em elementos de natureza objetiva (decorrentes das ações do sistema que formam o processo de apoio à decisão) e em elementos de natureza subjetiva, decorrente dos decisores (BANA E COSTA et al., 1995).

Este método permite também, a avaliação das ações em termos relativos ou absolutos. A avaliação relativa consiste em comparar as ações α de um dado conjunto A , diretamente entre si em termos de méritos relativos, objetivando ordená-las e avaliá-las. Esta avaliação relativa não possui valor quando a comparação é realizada de forma isolada.

A avaliação absoluta baseia-se no encaminhamento do estudo, no sentido de se obterem informações sobre o valor intrínseco de cada ação potencial comparada independentemente de qualquer outra (BANA E COSTA et al., 1995).

Define-se como ação, ao conjunto de atividades que a literatura denomina como criação, invenção, desenvolvimento, geração, especificação ou identificação de oportunidades (BANA E COSTA et al., 1995).

Geralmente, é comum se observar o descrédito ou menosprezo de qualquer avaliação por via subjetiva. Neste sentido, Bana E Costa et al. (1995) cita que, “adotar a via da objetividade, herdada das ciências exatas, repousa sobre a convicção errônea que consiste em considerar que a tomada de decisões deve ser expurgada de qualquer atitude subjetiva, pela procura quimérica da objetividade”. Assim, é preciso aceitar que, a subjetividade, também possa participar dos processos de avaliação.

Uma das principais justificativas para a escolha do MCDA está em que este método permite determinar uma escala de valores de intervalos (função de valor) para cada fator de manutenibilidade estudado. Com a escala de valor assim obtida poder-se-á aplicar a avaliação quantitativa destes fatores, no projeto ou em produtos/sistemas existentes, e com isto determinar um índice de manutenibilidade.

Apenas para ilustrar o método, serão abordadas aqui somente as informações mais relevantes, que interessam para a compreensão de sua aplicação neste trabalho.

A aplicação deste método exige as seguintes etapas:

- 1- Escolher os fatores de análise;
- 2- Confeccionar a árvore de influência dos fatores;
- 3- Estabelecer os descritores para cada fator;
- 4- Formular uma escala ordinal para os descritores;

- 5- Construir a função de valor através dos descritores, determinado-se assim uma escala de valor para cada fator, chamada de escala *Macbeth*;
- 6- Transformar a escala de valor de *Macbeth* em outra escala de referência para os níveis Bom e Neutro;
- 7- Determinar as taxas de substituição de cada fator (pesos);
- 8- Avaliar a sensibilidade das escalas obtidas.

A figura 3.2 mostra a seqüência a ser seguida por esta metodologia.

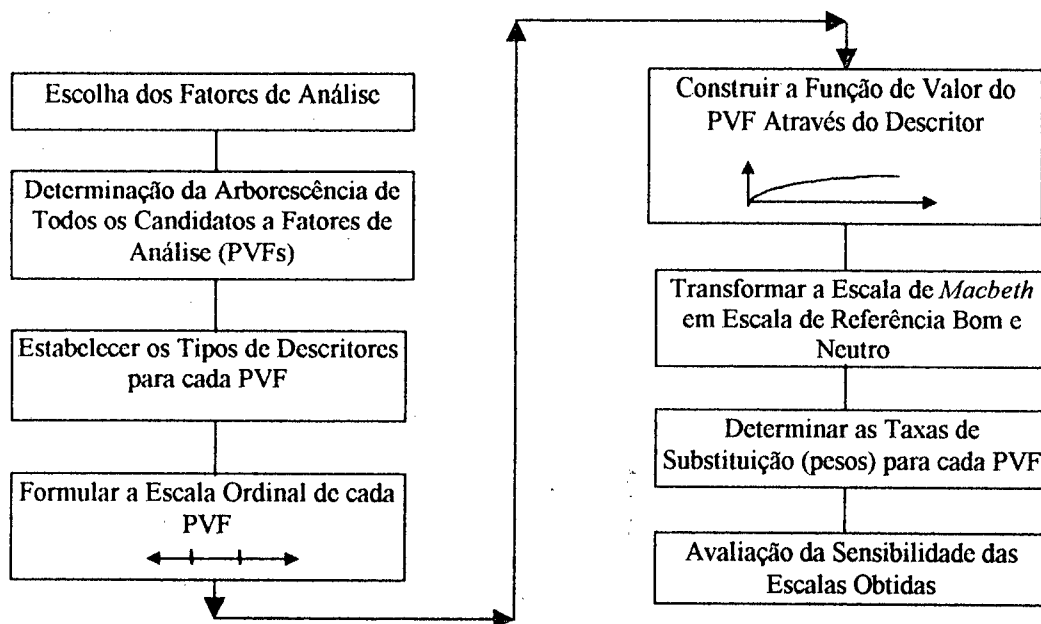


Fig. 3.2- Ciclo do método MCDA para determinar a função de valor de uma variável linguística e suas taxas de substituição.

A seguir apresentam-se os passos a serem seguidos para se realizar cada etapa enunciada.

3.4.1- Escolha dos fatores de análise - PVFs

O modelo MCDA estabelece que os fatores de análise, também chamados de pontos de vista fundamentais (PVFs), devem ser procurados através de um decisor.

Define-se como decisor a pessoa ou grupo de pessoas encarregadas de fixar e julgar os critérios de avaliação que o método exige, de forma subjetiva. Este decisor, na prática, é escolhido ou por que é o interessado no problema, ou por que é um especialista na área do tema que será tratado.

A opção de se trabalhar com um grupo de decisores está baseada na pretensão de se obterem características de valor do assunto em estudo, as mais representativas possíveis da realidade ou aceitação majoritária. Para isto, o método é aplicado individualmente a cada decisor e depois os resultados são agregados num valor global através de uma análise de equalização. O número de participantes para a formação do grupo não é definido pela bibliografia consultada sobre MCDA, mas a banca examinadora que aprovou o projeto deste trabalho sugere de 3 a 7 pessoas.

Existem outras duas figuras, neste processo, que devem ser definidas. Uma é a figura do facilitador que cumpre a função de intervir no processo de forma variável, mas nunca neutra. O facilitador cumpre um papel duplo neste processo, por um lado servindo de suporte para a comunicação entre os atores e/ou decisores e por outro lado, de guia para a elaboração, justificação e/ou transformação dos juízos de valor apresentados pelos mesmos. A outra figura (os atores), são os indivíduos que participam ou influenciam de forma direta ou indireta o processo de decisão.

A escolha dos fatores de análise para avaliação realiza-se em duas fases, ambas aplicando o método de mapa cognitivo, definido como representação mental do decisor sobre uma questão ou problema qualquer a ser analisado (ENSSLIN, 1998).

Na primeira fase, é solicitado ao decisor, através de um “*brainstorming*” que identifique todos os elementos possíveis que lhe vierem em mente sobre a questão a resolver. Os elementos obtidos nesta fase chamar-se-ão de elementos primários de avaliação.

Na segunda fase, determinam-se os candidatos a fatores de avaliação ou pontos de vista fundamentais (PVFs), a partir da primeira fase. Utiliza-se o termo de candidatos a PVFs porque estes, ainda, terão que ser testados para verificar se atendem às características que exige o método, após o qual poderão ser aceitos de forma definitiva. Estes testes serão explicados no próximo item.

Assim, para que estes fatores sejam considerados PVFs, devem apresentar uma estrutura de compromisso resultante da harmonia das diferentes perspectivas dos decisores, na qual os objetivos e as peculiaridades do contexto decisional estejam presentes e sejam a base de avaliação das alternativas de ação. Para isso, devem possuir as seguintes propriedades (BANA E COSTA, et al., 1995):

- Inteligibilidade: para que um fator seja considerado PVF é necessário que sirva como ferramenta para traçar as preferências dos atores do contexto decisional como comunicação, argumentação, confrontação de valores e convicções entre os mesmos;
- Consensualidade: para ser considerado PVF, o que ele representa deve ser considerado importante por todos os atores, assim poderá ser considerado no modelo de avaliação;
- Operacionalidade: um ponto de vista será fundamental se for operacionável, ou seja, se permitir à construção de uma escala de preferência local associada a seus níveis de impacto, possibilitando também, a construção de um indicador de impacto associado ao mesmo. Segundo Bana e Costa (apud ENSSLIN, 1998) a primeira condição é necessária, mas não suficiente, pois é indissociável da segunda;
- Isolabilidade: deve ser possível avaliarem-se todas as alternativas potenciais desse PVF, independentemente dos valores ou impactos que possuam todos os outros PVFs.

Este conjunto de fatores escolhidos, em primeira instância, denomina-se de família de PVFs e deverá ser testado para verificar se cumprem com as exigências e características do método.

3.4.1.1- Propriedades que devem cumprir os PVFs

Uma família de fatores, para ser considerada PVFs definitiva, deve satisfazer as seguintes características:

- Essencial: representar valores ou aspectos importantes ou fundamentais do que se quer medir;
- Controlável: avaliar única e exclusivamente os valores ou aspectos do contexto que está sendo analisado;
- Completo: fornecer todos os aspectos relevantes aos olhos do decisor, ou seja, conter todos as características relevantes para uma análise de valor representativa;

- **Conciso:** ser reduzido somente o necessário, para permitir a avaliação desejada, que da mesma forma deve ser completa;
- **Mensurável:** permitir uma definição precisa além de especificar os vários graus ou níveis de influência;
- **Operacional:** permitir obterem-se as informações necessárias para relacionar as várias ações com suas possíveis conseqüências, bem como informações de valor que permitam especificar a atratividade relativa destas conseqüências em termos de valor de referência;
- **Independência:** ter independência preferencial ordinal e cardinal, quer dizer, ser independentes das influências relativas de outros PVFs;
- **Não redundantes:** não existir dupla avaliação dos aspectos analisados, ou seja, não considerar o mesmo aspecto ou característica por mais de um PVFs;
- **Inteligível:** permitir uma descrição clara e não ambígua para que diferentes pessoas possam associar ou interpretar um mesmo nível de impacto na ação analisada;

As propriedades mencionadas devem ser testadas em todos os candidatos a PVFs para serem aprovados definitivamente.

3.4.1.2- Arborescência dos Fatores - PVFs

A representação de um conjunto ou família de PVFs é feita através de um gráfico de arborescência e se constrói a partir de um mapa cognitivo. Isto permite facilitar a visualização, aumentando a compreensão sobre o contexto representado, bem como o consenso das pessoas que o analisam, pois o mesmo representa uma estrutura única para o problema apresentado.

Esta estrutura em forma de árvore pode ser ramificada para a direita, criando subgrupos chamados de pontos de vistas elementares (PVEs), porém hierarquicamente inferiores aos da esquerda, que são considerados fins para o objetivo procurado. Já os PVEs da direita, são considerados meios para atingir os PVFs fins (esquerda).

Esta disposição gráfica auxilia a análise, pois permite visualizar ao mesmo tempo o conjunto de fatores (PVFs meio e fim) e sua interdependências ou disposição hierárquica entre os mesmos.

A figura 3.3 mostra como exemplo uma estrutura da árvore de PVFs e suas ramificações, pertencentes a indicadores das características de manutenibilidade, encontradas na maioria das bibliografias que tratam desta área (PATTON, 1994; BLANCHARD et al., 1995), e complementadas neste estudo (item 2.2 e 2.2.1).

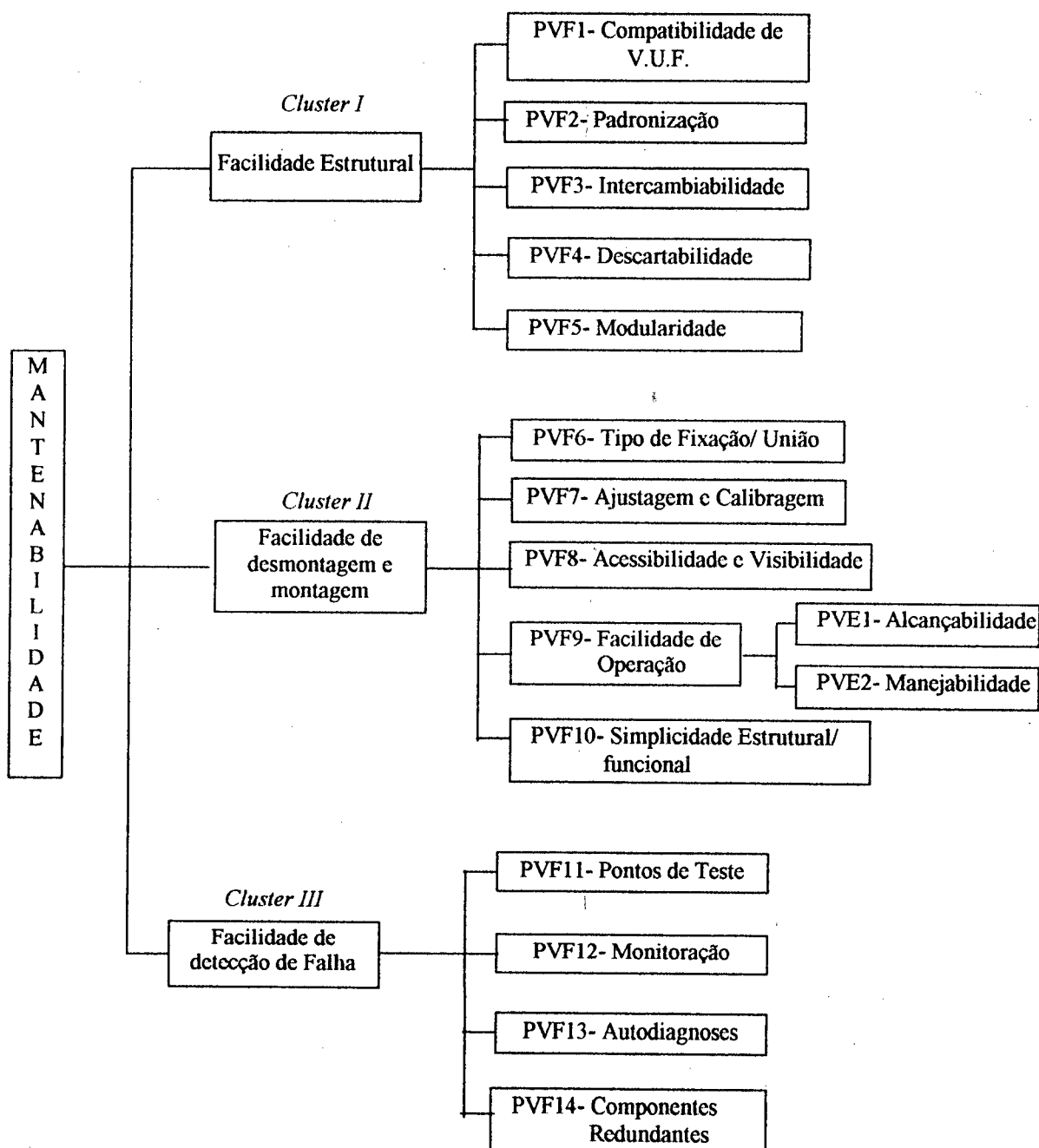


Fig. 3.3- Árvore de PVFs pertencentes a características de manutenibilidade.

Todavia, na pesquisa para este trabalho detectou-se que estes indicadores são exclusivos ou específicos para cada área do sistema de manutenção (produto/sistema, processo, mão de obra, organização, logística, meio ambiente, etc.) e tipo de atividade (lubrificação, diagnóstico, preventiva - preditiva, desmontagem e montagem, etc.) (ver item 2.2.1 e figura 2.12).

Assim, pela agrupação dada aos indicadores no item 2.2.1, segundo a participação no projeto de manutenibilidade em produtos/sistemas e definidos segundo a atividade de manutenção para a qual contribuem, escolheram-se três grupos para serem representados nesta árvore.

Deve-se distinguir que esta árvore começa com o objetivo estratégico ou fim do problema (Manutenibilidade) e por isso chamado de cabeça da árvore. Logo continua com as famílias ou *clusters* (I, II e II) definidos como o conjunto de fatores (PVFs) e subfatores (PVEs) relacionados a uma mesma área ou condição do problema, formando grupos de interesse ou especialidade.

A importância destes *clusters* é por serem de conteúdos independentes, podendo ser estudados em separado, facilitando a análise do objetivo fim. Finalmente, a árvore mostra os ramos de argumentação do conteúdo de cada *cluster*, representados pelos fatores ou PVFs, e suas ramificações dependentes hierarquicamente, representadas pelos subfatores ou PVEs. Os fatores e critérios para se chegar à formação desta árvore específica foram tratados nos itens 2.2 e 2.2.1.

Deve-se lembrar que a área de interesse deste trabalho está representada pelo *cluster* II, ou seja “Facilidade de desmontagem e montagem”. Escolha que se deu pela larga experiência do autor nesta área de manutenção e por ser a área que envolve os maiores tempos do ciclo geral manutenção (ver anexo C).

3.4.2- Definição dos Descritores ou Pontos de Vista Elementares (PVEs)

Os descritores ou PVEs podem ser definidos como o conjunto de níveis que servem de base ou referência para descrever os possíveis valores ou níveis de impacto, aos quais os PVFs poderão ser associados em função do estado ou condição apresentada. Estes níveis (PVE) não devem ser dúbios, possuindo significados entendíveis por qualquer pessoa e permitindo uma clara distinção entre os diferentes possível níveis, para não permitir que numa

dada condição dos PVFs lhes sejam associados, indiferentemente, um ou outro nível de impacto. Assim, os descritores devem ser operacionais.

Os descritores dos PVFs são construídos através de debates entre o facilitador e os atores, entretanto pode-se recorrer quando necessário a especialistas do assunto em questão. A definição dos descritores (PVE) é o ponto de partida para a construção da função de valor, pois estes tornam os fatores (PVFs) mensuráveis de forma quantitativa, a partir dos quais é construída a escala de valor ou níveis de impacto para cada descritor.

Os descritores podem ser classificados em três dimensões que são: Quantitativos ou Qualitativos, Discretos ou Contínuos e finalmente, Diretos ou Indiretos. Segundo Bana E Costa et al. (1995), esses dois últimos descritores ainda podem ser classificados como Naturais ou Construídos.

Descritores quantitativos possuem níveis com caráter quantificável através de números. Já, os descritores qualitativos representam-se através de expressões semânticas.

Descritores contínuos são aqueles cujos níveis são constituídos por uma função contínua e, os descritores discretos são aqueles formados por um número finito de níveis.

Descritores diretos possuem uma forma de medida intrínseca que lhes é implícita e claramente reconhecível ou aceita por qualquer pessoa. Por sua vez, este descritor direto pode ser natural ou construído.

Pertencem ao tipo de descritor direto e natural, quando sua unidade de medida lhe é naturalmente associada, como é o caso (p. ex.) do custo de manutenção em reais.

Já um Descritor Direto construído caracteriza-se por não apresentar uma unidade de medida natural, pois levam em consideração geralmente aspectos qualitativos e/ou semânticos. Exemplo deste tipo de descritor poderia ser o fator manejabilidade com diferentes possíveis níveis de avaliação, tais como: totalmente manejável; não manejável; etc.

Os Descritores Indiretos também podem ser Naturais ou Construídos, e possuem a mesma descrição colocada para os descritores diretos, com a diferença que neste caso a avaliação dos PVFs se realiza de forma indireta, através de um indicador ou ponto de vista elementar (PVE) indireto. Para o tipo de Descritor Indireto Natural, pode-se colocar como

exemplo, o fator “acessibilidade”, utilizando-se como nível de avaliação a área em metros quadrados.

Para os Descritores Indiretos Construídos, o indicador indireto utilizado não possui um indicador natural por ser um PVE qualitativo. Para este caso, o exemplo poderia ser o fator de “Tipo de Fixação/ União”, que será utilizado como exemplo neste Capítulo, cujos indicadores seriam dados em função de referências padrões como: presilha elástica; passador; came; parafuso; luva de união; etc.

Todavia, os descritores construídos podem ser pictóricos, ou seja, representados por recursos visuais como figuras, desenhos, fotografias, etc. Um exemplo deste tipo de descritor seria representar o PVF “Tipo de Fixação/ União” apresentado acima, em forma de desenhos ou fotografias (ver Anexo F).

É muito importante salientar que a escolha dos níveis dos descritores ou PVE seja correta, pois se houver qualquer inversão nesta escolha, do tipo: utilizar Descritor Direto Natural quando corresponde um Descritor Indireto Natural ou vice-versa, o modelo poderá ocasionar avaliações erradas.

Assim, a escolha de descritores deve atender a exigências básicas, as quais passa-se a descrever:

- Ambigüidade: é considerado não ambíguo aquele descritor ou PVE em que cada um de seus níveis de impacto tem um significado claro e facilmente distinguível entre os outros níveis;
- Mensurabilidade: um descritor que é mensurável define o estado ou nível de impacto de um PVF de forma detalhada e precisa, sem dar lugar a ambigüidade de interpretação. Os níveis de impacto tipo “bom”, “fraco”, “ruim”, diminuem a mensurabilidade do descritor;
- Operacionalidade: um descritor ou PVE é considerado operacional quando permite descrever os diferentes estados dos (PVFs) e, por sua vez, fornece uma base para o julgamento do nível em questão por qualquer decisor;
- Compreensibilidade: para que um descritor ou PVE seja compreensível deve permitir descrever e interpretar o nível de impacto de forma não ambígua, quer dizer o valor que uma pessoa associa a um determinado nível deve ser o mesmo que qualquer outra pessoa possa interpretar.

Para melhor entender este processo, executa-se um descritor completo para um dos fatores pertencente à família de PVFs da figura 3.3, considerando-se para este exemplo o PVF-6 “Tipo de Fixação/ União”.

Para construir o descritor deste PVF, deve-se procurar seus PVEs (pontos de vista elementares) através de um mapa cognitivo. A construção deste mapa exige primeiro definir e especificar o fator (item 2.2).

Assim, este fator refere-se ao tipo de união e fixação dos componentes de um sistema, quanto ao modo ou forma de solda ou fixação e/ou união de seus componentes, com finalização rápida da tarefa durante a desmontagem ou montagem dos elementos. Ou seja, esta característica diz respeito a como facilitar a atividade que geralmente consome a maior percentagem do tempo total da atividade de manutenção, ou seja, desmontagem e montagem (ver Anexo C).

Para procurarem-se os PVEs ou níveis de impacto na construção do descritor deste fator, aplica-se a técnica de mapa cognitivo com os decisores, os quais escolherão para este caso, um descritor do tipo indireto construído e seus possíveis níveis de impacto (PVEs). A figura 3.4 mostra um exemplo deste descritor.

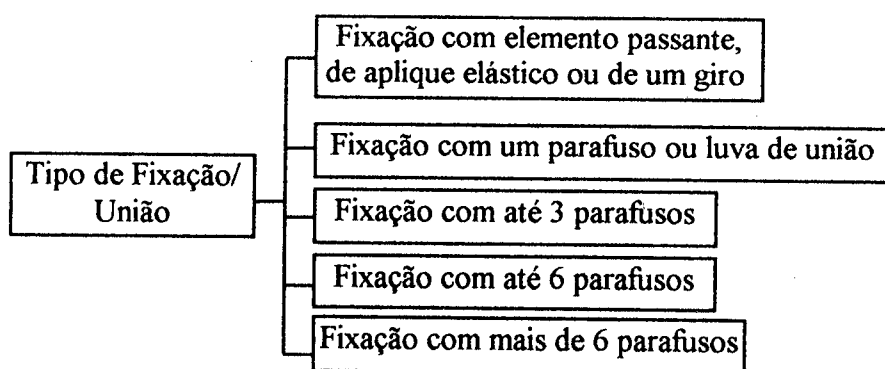


Fig. 3.4 - Árvore de níveis de impacto (PVEs) do fator (PVF), Tipo de Fixação/ União.

Esta família de descritores ou PVEs constituem a árvore de níveis de impacto do PVF analisado.

Depois de feita a escolha dos níveis de impacto de um descritor (PVE), como o realizado anteriormente, passa-se a verificar se há combinações entre estes níveis e quais são elas. Estas combinações dizem respeito ao acontecimento de mais de um nível de impacto (ao mesmo tempo), sobre uma determinada ação, gerando no total mais níveis de impacto, que depois serão arrumados hierarquicamente de forma decrescente, segundo uma escala ordinal. Entretanto, para este descritor específico, não acontece tal combinação, ficando originalmente como descrito na figura 3.4. Este tema específico sobre análise de combinações entre PVEs de um descritor, gerando uma gama hierarquizada de níveis de impacto, serão tratados no item 3.4.2.1.

Finalmente, para aprovar a escolha de um descritor, com sua correspondente escala ordinal, deve ser realizado o teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal. Estes testes são feitos através de comparações par a par com toda a família de fatores (PVFs), verificando se a escolha de um determinado fator independe da escolha dos outros fatores, ou seja, se são independentes entre si. Esta verificação deve ser feita na escala ordinal e cardinal e ser independente em ambas as escalas para toda a família de PVFs. Este assunto será abordado com detalhe no item 3.4.3.3.

3.4.2.1- Descritores Construídos pela Combinação entre Níveis de PVEs

Quando o descritor de um PVF precisa ser construído, através de PVEs, estes possuirão combinações entre seus possíveis estados, que deverão ser construídos e arrumados hierarquicamente, segundo juízos dos decisores para se obterem os níveis de impacto do descritor.

Para melhor compreender este mecanismo será utilizado como exemplo o PVF-9 da figura 3.3 “Facilidade de Operação”, com os PVEs “Acessibilidade e Visibilidade”.

Da mesma forma que no item anterior, é necessário definir este fator segundo já colocado no item 2.2:

- **Acessibilidade;** avalia a facilidade ou esforço de se chegar até o componente ou sistema (com ou sem ferramentas comuns e/ou especiais), para exercer atividades de manutenção sobre o mesmo.
- **Visibilidade;** avalia a facilidade ou esforço de se visualizar o componente ou sistema (com ou sem auxílio ou recursos de aparelhos óticos), para exercer atividades de manutenção sobre o mesmo.

Para construir as combinações possíveis deste descritor deve-se especificar (através dos decisores) os diferentes estados de cada PVE, neste caso “Acessibilidade e Visibilidade”, que representados graficamente tem-se a figura 3.5:

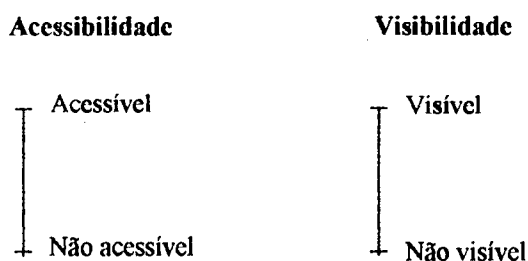


Fig. 3.5- Possíveis estados dos PVEs “Acessibilidade e Visibilidade”.

A figura 3.6 mostra as possíveis combinações entre os diferentes estados dos PVEs “Acessibilidade e Visibilidade”, dando como resultado os níveis do descritor do PVF “Facilidade de Operação”, incluindo-se uma representação simbólica para melhor interpretação.

NÍVEL	DESCRIÇÃO	SÍMBOLO
N4	Totalmente acessível e visível	
N3	Totalmente acessível porém não visível	
N2	Totalmente visível porém não acessível	
N1	Não possui acessibilidade nem visibilidade	

Fig. 3.6- Níveis do descritor construído para avaliar o fator “Facilidade de Operação”.

Os níveis do descritor da figura 3.6 estão ordenados hierarquicamente de forma decrescente em função da atratividade apresentada por cada nível, segundo juízos de valor dos decisores. No caso do exemplo utilizado, esta ordenação foi facilitada pela simples observação dos seus níveis, entretanto quando este procedimento não for suficiente para decidir sua hierarquização, pode ser utilizada a matriz de ordenação da figura 3.20 (Algoritmo de Thompson).

3.4.2.2- Escala Ordinal dos Descritores

Para se criar esta escala, primeiro deve-se ordenar, de forma hierárquica decrescente (em função do valor da propriedade que representa), os possíveis estados do descritor do PVF, para o qual se utilizará como exemplo o fator desenvolvido no item 3.1.3 “Tipo de Fixação/ União” (figura 3.4). Esta ordenação dá como resultado, para este caso, uma escala ordinal indireta construída com cinco níveis de impacto (Ni). Estes níveis estabelecem os possíveis estados de avaliação do descritor. A escala assim formada (figura. 3.7), denomina-se de níveis do descritor do fator “Tipo de Fixação/ União”.

Nos casos em que o descritor do PVF possua PVEs para sua construção, estes possuirão combinações entre seus possíveis estados, que deverão ser construídos e arrumados hierarquicamente segundo demonstrado no item anterior. Neste exemplo não foi necessário, porque o descritor utilizado não possui PVEs ou combinações entre seus possíveis níveis, determinando sua ordenação decrescente de forma imediata com a simples observação dos intervalos apresentados na figura 3.4.

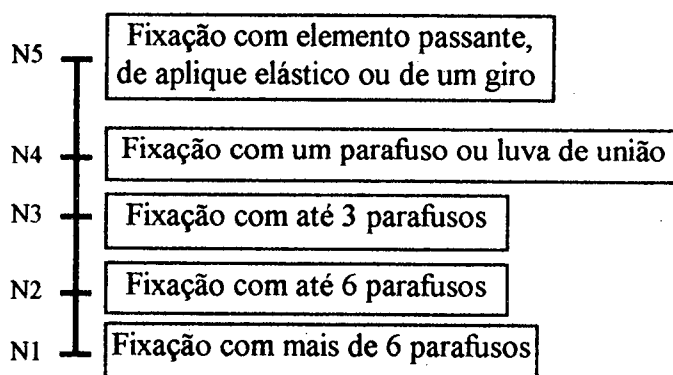


Fig. 3.7- Descritor ordinal do fator “Tipo de Fixação/ União”.

O passo seguinte será gerar a função de valor deste descritor.

3.4.3- Função de Valor dos Descritores - Escala *Macbeth*

Nos itens anteriores foram mostrados os PVFs, seus descritores, tipos de descritores, condições que devem cumprir e como construí-los, com alguns exemplos. Neste item será mostrada a metodologia para construção da função de valor, que é uma forma de se expressar matematicamente, através de gráficos ou escalas numéricas, o julgamento analítico do valor de um decisor sobre um determinado critério. Assim, a função de valor procura transformar variáveis lingüísticas obtidas por avaliações subjetivas, através de representações semânticas, em valores numéricos que representem o grau de atratividade de um determinado nível de impacto sobre um PVF.

Matematicamente uma função de valor $v(a)$ deve observar as seguintes condições:

- 1- Para todo $a, b \in A$ (em termos de um PVFi), $v(a) > v(b)$ se e somente se para o avaliador “a” é mais atrativo que “b”; ($a P b$) (lê-se: a preferível de b);
- 2- Para todo $a, b \in A$, $v(a) = v(b)$ se e somente se para o avaliador “a” é indiferente de “b”; ($a I b$);
- 3- Para todo $a, b \in A$, $v(a) - v(b) > v(c) - v(d)$ se e somente se para o avaliador a diferença de atratividade entre “a” e “b” é maior que a diferença de atratividade entre “c” e “d”.

Resumindo funções de valor são representações quantitativas de julgamento analítico subjetivo. Estas representam numericamente o juízo valor analítico de um indivíduo ou grupo, sobre uma ação ou variável semântica, sendo alcançado por este método um valor numérico sobre este julgamento, relativo a níveis de referências balizadores do processo. As escalas numéricas (função de valor), assim obtidas, representam os possíveis níveis de impacto do valor de preferência que uma determinada variável lingüística poderá adquirir em uma análise feita através de representações semânticas (PVFs e PVEs) por meio de um decisor. Estas escalas poderão ser ordinais, de intervalo ou de razão.

A primeira (ordinal) guarda em seus intervalos unicamente uma relação de ordenação hierárquica crescente ou decrescente, identificando entre dois níveis de escala, qual é o mais preferível e o menos preferível. Este tipo de escala é utilizado, quando o decisor só consegue obter uma ordenação de intervalos sem que possa atribuir valores quantitativos de preferência. Esta escala agrega menos informação que as outras duas.

O segundo tipo de escala, a de intervalos (com função $y = a \cdot x + b$), além de possuir uma ordenação hierárquica, seus níveis de intervalo também possuem valores quantitativos, que permitem unicamente avaliação ou comparação através dos intervalos entre níveis de escala, mas nunca esta comparação poderá ser entre os pontos do seu nível de escala. Isto acontece porque sua geração é feita arbitrando-se dos de seus níveis, em que geralmente se usa o zero como um deles. Por isto se diz que esta escala tem dois graus de liberdade. A escala de grau Celsius é parte deste tipo de escala.

O terceiro tipo, a escala de razão (com função $y = a \cdot x$), diferencia-se da anterior em dois quesitos, o primeiro quando o nível zero da escala é fixo e não arbitrado, simbolizando ausência do elemento que mede, isto faz com que esta escala seja de um grau de liberdade. O segundo quesito de diferenciação está em que seus níveis de escala representam razões de valor e como tal seus pontos de escala podem ser comparados. Exemplo deste tipo de escala é o grau Kelvin.

Para a construção de escalas cardinais sobre um conjunto de ações “A” pode-se empregar os seguintes métodos: o método da BISSECÇÃO, especialmente utilizado quando os descritores são contínuos; o método DIRECT RATING, talvez o método numérico mais importante e amplamente usado para construção de funções de valor, e o método *MACBETH*, que utiliza o conceito de atratividade para medir o valor das ações potenciais, transformando escalas semânticas em cardinais.

Para se desenvolver as funções de valor dos PVFs, através de seus descritores, neste trabalho utilizar-se-á o método de *Macbeth* (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), desenvolvido por Bana E Costa; Corte; Vasnick, (1997), que faz parte da metodologia MCDA e se descreve neste item.

Aqui utilizar-se-ão as escalas de intervalo, aplicando-se a matriz de *Macbeth*, que simplifica a construção da função de valor através do uso de julgamento semântico. Assim, a função de valor é construída, através da solução desta matriz (Figura 3.9), que por trabalhar com informações qualitativas, utiliza o modelo de programação linear para determinar o conjunto de funções de valor numérico que melhor representem o julgamento do decisor.

Para preencher esta matriz, o método *Macbeth* utiliza um procedimento que consiste em questionar os decisores, através do facilitador, para que se decida a melhor opção entre

duas possíveis, avaliando esta atratividade com uma escala que utiliza as seguintes categorias semânticas padronizadas pelo método MCDA (Figura 3.8):

Escala de Atratividade	
C0	Indiferença
C1	Muito fraca
C2	Fraca
C3	Moderada
C4	Forte
C5	Muito forte
C6	Extrema

Fig. 3.8- Categorias semânticas da escala de atratividade utilizada por *Macbeth*.

Com esta categoria de possíveis atratividades, a metodologia *Macbeth* preenche a matriz da figura 3.9 (denominada de matriz de juízo de valor), com o resultado da resposta do decisor, quando perguntado sobre a atratividade que oferece cada nível da escala ordinal de um descritor (como por exemplo, o da figura 3.7, “Tipo de Fixação/ União”), tomado de dois em dois no sentido decrescente. Este preenchimento se faz com o número do subíndice $i \in \{0,1,2,3,4,5,6\}$ da letra C utilizada na escala de atratividade (Figura 3.8). Cabe ressaltar que estes valores “i” de preenchimento são apenas indicadores semânticos da diferença de atratividade entre o par de ações comparado, ou seja, esses números não são valores reais, não tendo, portanto, nenhum significado matemático, a não ser de operadores para solução da matriz.

Para melhor entender o método, veja-se o preenchimento da matriz de juízo de valor da figura 3.9, para se obter a função de valor do descritor da figura 3.7, pertencente ao PVF “Tipo de Fixação/ União”. Este preenchimento se realiza da forma indicada a seguir, segundo respostas do decisor à pergunta do facilitador: qual a diferença de atratividade que julga para passar do nível de impacto N_n para N_{n-1} ?

Seguindo este procedimento tem-se:

- Primeira fila: Passar de N5 para N4 ; resposta: C2 - (2)
 Passar de N4 para N3 ; resposta: C4 - (4)
 Passar de N3 para N2 ; resposta: C5 - (5)
 Passar de N2 para N1 ; resposta: C6 - (6)
- Segunda fila: Passar de N4 para N3 ; resposta: C3 - (3)
 Passar de N3 para N2 ; resposta: C4 - (4)
 Passar de N2 para N1 ; resposta: C5 - (5)
- Terceira fila: Passar de N3 para N2 ; resposta: C3 - (3)
 Passar de N2 para N1 ; resposta: C5 - (5)
- Quarta fila: Passar de N2 para N1 ; resposta: C4 - (4)

A diagonal da matriz é preenchida com valor zero por se compararem ações com o mesmo nível, como por exemplo, N1 com N1, N2 com N2, etc. Todavia deve-se observar, que o preenchimento de cada linha da matriz de juízos de valor deve ser realizada de forma progressiva (esquerda à direita), com categorias semânticas da escala de atratividade, igual ou maior ao julgamento da ação anterior, mas nunca com valores menores. De forma semelhante acontece com as colunas, que devem ser preenchidas de cima para baixo, com categorias semânticas de valores iguais ou menores, pois do contrário geram-se problemas de inconsistência que serão abordados no próximo item.

Indicador: Tipo de Fixação/ União	Nível Escalar	N5	N4	N3	N2	N1
Fixação com elementos passante, de aplique elástico ou de um giro	N5	0	2	4	5	6
Fixação com um parafuso ou luva de união	N4		0	3	4	5
Fixação com ate 3 parafusos	N3			0	3	5
Fixação com ate 6 parafusos	N4				0	4
Fixação com mais de 6 parafusos	N1					0

Fig. 3.9- Preenchimento da Matriz de *Macbeth* para o descritor “Tipo de Fixação União”.

Desta análise resultaram os valores preenchidos na matriz de julgamento da figura 3.9, que serão passados para o *software Macbeth* (BANA E COSTA; CORTE; VASNICK, 1997) que dará o resultado da função de valor procurada (figura 3.10), incluindo uma análise de sensibilidade dos limites (máximo e mínimo), de cada valor numérico assumido pela escala proposta.

Esta apresentação que o *software* oferece, permite visualizar possíveis correções que se fazem necessárias, até por que o próprio *software* avisa quando alguma inconsistência se tenha praticado no preenchimento da matriz, e os novos valores de correção poderão ser decididos em função dos limites apresentados na sensibilidade mostrada pelo *software* (valores máximos e mínimos da figura 3.10).

Nível	Escala <i>Macbeth</i>	Mínimo	Máximo
N5	100,0	83,4	108,2
N4	83,3	79,2	91,5
N3	58,3	50,1	66,5
N2	33,3	29,2	41,5
N1	0	-33,3	8,2

Fig. 3.10- Resultado da Matriz *Macbeth*, Correspondente à Função de Valor do PVF “Tipo de Fixação/ União”.

A figura 3.11 e 3.12 correspondem ao gráfico e valores dos níveis de impacto da função de valor obtida pela matriz de *Macbeth*.

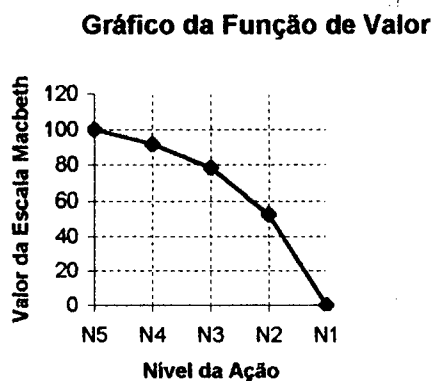


Fig.3.11- Gráfico da Função de Valor do Fator - Tipo de Fixação/ União.

Nível de Impacto	Descrição	Escala <i>Macbeth</i>
N5	Fixação com elementos passante, de aplique elástico ou de um giro	100
N4	Fixação com um parafuso ou luva de união	83,3
N3	Fixação com ate 3 parafusos	58,3
N2	Fixação com ate 6 parafusos	33,3
N1	Fixação com mais de 6 parafusos	0

Fig. 3.12- Escala de valores dos níveis de impacto (PVEs) do Descritor do PVF “Tipo de Fixação/ União”.

Obtida a escala de valores correspondente ao PVF, poder-se-á avaliar o nível ou valor escalar do fator sobre o produto/sistema. Esta avaliação se faz de forma direta, identificando a que nível de impacto da escala de valor obtida (p. ex., Figura 12) lhe corresponde ao item do produto analisado. Desta comparação, o valor atribuído será o mais próximo dos níveis disponíveis (ou interpolação) na escala de valor de referência.

3.4.3.1- Inconsistência nos Julgamentos de Valor

O decisor ao emitir seus juízos absolutos de diferenças de atratividade entre os pares de ações de um conjunto “A” pode gerar dois tipos de inconsistência: semântica e cardinal. Isto ocorre especialmente, quando o número de ações a serem comparadas é elevado, pois aumenta sensivelmente o número de julgamento por parte do decisor, ficando difícil para o mesmo avaliá-las de forma coerente. A seguir explicar-se-á cada uma delas:

- Consistência Semântica. Esta consistência pode ser avaliada em termos de comparação entre as ações, realizando-se para isto o seguinte teste:

$$(a,b) \in C_i \text{ e } (b,c) \in C_{i'} \Rightarrow (a,c) \in C_{i''} ; \text{ com } i'' \geq \max \{i, i'\};$$

Isto significa que, ao avaliar a diferença de atratividade entre as ações “a” e “c” ($V_{(a)} - V_{(c)}$), o decisor deverá atribuir uma categoria de atratividade $C_{i''}$, com $i'' \geq i$. Assim, a diferença de

atratividade entre o par de ações (a, c) é pelo menos tão grande quanto a diferença entre (a, b) (BANA E COSTA et al., 1995). A figura 3.13 mostra um exemplo gráfico de consistência semântica para os julgamentos de diferença de atratividade entre os pares de ações, como forma prática de verificar a consistência no preenchimento da matriz de juízo de valor. Com este proceder, o decisor será semanticamente consistente no preenchimento dos valores da matriz de juízos de valor, tomando sempre a precaução de preencher as linhas (de esquerda à direita) de forma crescente e as colunas (de cima para baixo) de forma decrescente.

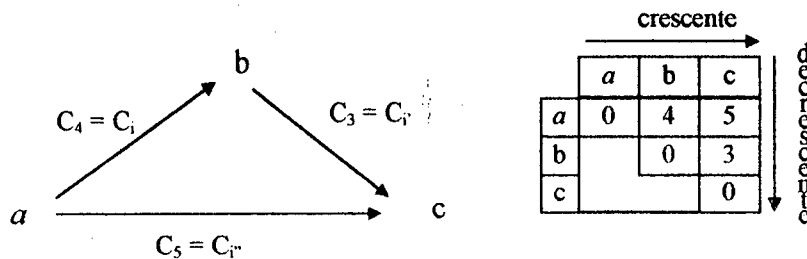


Fig. 3.13- Exemplo prático de julgamento na matriz de juízo de valor para verificar consistência semântica.

- Inconsistência Cardinal. Esta inconsistência dá-se quando a matriz de juízos de valor é semanticamente consistente, mas esse conjunto de julgamentos de valor do decisor não pode ser representado numericamente na solução da matriz, constatando-se neste caso a inconsistência cardinal. Segundo Bana e Costa et al. (1995), “é bem conhecido da teoria que a representação numérica de semi-ordens múltiplas por limiares constantes nem sempre é possível, ocorrendo neste caso a inconsistência cardinal, pela qual o decisor deverá rever seus julgamentos até obter a consistência desejada”. A verificação de consistência na metodologia *Macbeth* dá-se de forma automática num processo iterativo para a construção de uma escala de valor cardinal sobre um conjunto de ações. Para isto, o *software* que dá a solução da matriz, está constituído de quatro programas lineares sequenciais, denominados MC1, MC2, MC3 e MC4, sendo que:

- primeiro deles (MC1), analisa a consistência cardinal dos julgamentos de valor do decisor, indicando se o problema de semi-ordens múltiplas tem ou não solução;
- segundo (MC2), fornece uma escala numérica representativa dos valores declarados na avaliação das ações;

- por último, os programas MC3 e MC4 auxiliam no processo de revisão dos julgamentos de valor, fornecendo as possíveis causas de inconsistência. Cabe destacar que estes programas monitoram mas não resolvem os problemas de inconsistência, pois esta solução deve ser procurada pelo próprio facilitador/ decisor.

Observando os cuidados mencionados neste item para o preenchimento da matriz se garantirá a consistência da mesma.

3.4.3.2- Transformação da Escala de *Macbeth* em Escala de Referência para os Níveis Bom e Neutro

Após determinar a função de valor, o próximo passo é transformar o valor da escala de *Macbeth* com o nível Neutro (pior), no valor referente 0 (zero), e a do nível Bom (melhor), no valor de referência 100 (cem). Isto se faz necessário por que:

- os teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal são executados levando-se em consideração os níveis de impacto de referência Bom e Neutro;
- as taxas de substituição ou pesos relativos dos critérios (que serão determinados no próximo item), são calculados levando-se em conta o intervalo de variação entre a opção mais preferida (Bom) e a menos preferida (Neutro) em cada critério e; porque as taxas de substituição do modelo são fatores de escalarização, ou seja, transformam valores de escala locais em valores globais de preferência.

Para efetuar esta conversão usa-se uma transformação linear do tipo $(a \cdot r + b)$, onde “r” é a escala de intervalo original, e (a, b) são os coeficientes de transformação.

Veja-se o procedimento em detalhe com a transformação da escala obtida no item anterior, segundo os três passos seguintes:

- **1º Passo:** Fazer que o grupo de decisores escolha um nível de referência Bom (maior preferência), e um nível com referência Neutra (menor preferência). Assim, para o exemplo utilizado acima, escolheram-se o nível Bom para $N4 = 83,3$ e o nível Neutro para $N2 = 33,3$ (segundo valor da escala *Macbeth*);
- **2º Passo:** Deve-se achar o valor dos coeficientes a e b , para a transformação linear do tipo:

$$(a \cdot r + b)$$

Para o exemplo, esta transformação fica:

Para o nível Bom: $a \cdot 83,3 + b = 100$

Para o nível Neutro: $a \cdot 33,3 + b = 0$

Com este sistema de duas equações com duas incógnitas acham-se os valores:

$$a = 2 \quad e \quad b = -66,6$$

- **3º passo:** Consiste em calcular-se a nova escala, para cada nível N_i com os valores de a e b determinados no passo anterior. A nova escala para cada nível N_i do exemplo, fica da seguinte forma:

$$N5 = 100 \cdot a + b = 100 \cdot 2 + (-66,6) = 133,4$$

$$N4 = 83,3 \cdot 2 + (-66,6) = 100 \text{ (Nível Bom)}$$

$$N3 = 58,3 \cdot 2 + (-66,6) = 50$$

$$N2 = 33,3 \cdot 2 + (-66,6) = 0 \text{ (Nível Neutro)}$$

$$N1 = 0 \cdot 2,55 + (-66,6) = -66,6$$

A nova escala é representada na figura 3.14.

Nível de Impacto	Descrição	Escala Macbeth	Escala Macbeth Transformada	Nível de referência
N5	Fixação com elementos passante, de aplique elástico ou de um giro	100	133,4	
N4	Fixação com um parafuso ou luva de união	83,3	100	Bom
N3	Fixação com ate 3 parafusos	58,3	50	
N2	Fixação com ate 6 parafusos	33,3	0	Neutro
N1	Fixação com mais de 6 parafusos	0	-66,6	

Fig. 3.14- Escala transformada para os níveis Bom e Neutro do PVF – “Tipo de Fixação/ União”.

O gráfico da figura 3.15 corresponde à função de valor transformada para os níveis Bom e Neutro.

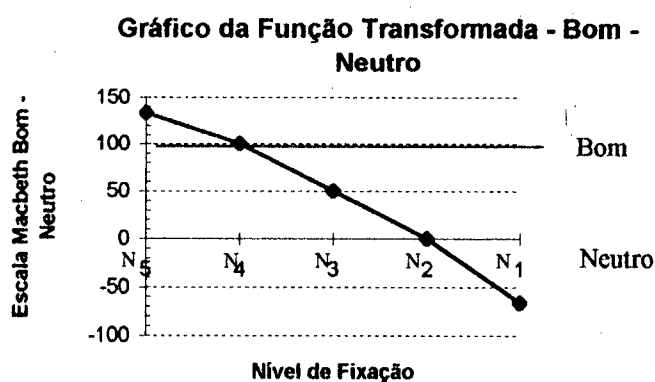


Fig.3.15- Gráfico da Função Transformada para o Nível Bom e Neutro.

Apresentou-se a forma de transformar as escalas de valor em escalas de referência para os níveis Bom e Neutro, que serão utilizadas para executar os testes de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal do próximo item.

3.4.3.3- Teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal

Finalmente, para aprovar a escolha dos descritores com suas correspondentes escalas ordinais e cardinais de níveis de impacto, deve ser realizado o teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal ou teste de isolabilidade.

Estes testes serão realizados pelo facilitador, através de comparações par a par com toda a família de PVFs, verificando se a escolha de um determinado nível escalar de um fator (PVF) independe da escolha dos níveis escalares dos outros fatores, ou seja, se são independentes entre si. Esta verificação deve ser feita na escala ordinal e cardinal, onde os PVFs devem ser independentes em ambas escalas para toda a família de fatores. O teste de Independência Preferencial Ordinal é realizado da seguinte maneira:

De uma família de PVFs (como por exemplo, o *cluster* II retirado da figura 3.3), tomam-se primeiramente dois deles, em dois níveis escalares de impacto específicos (Bom e Neutro), como mostra a figura 3.16.

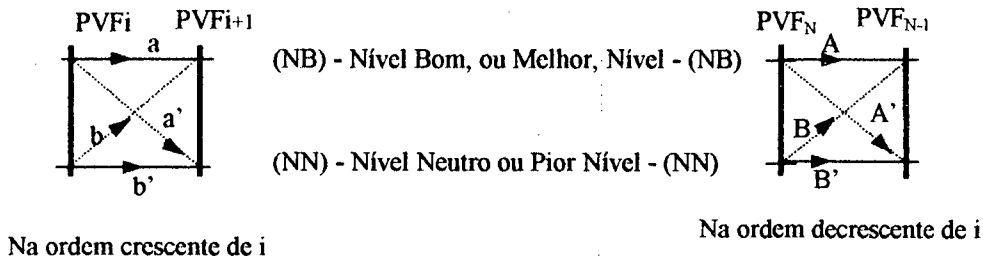


Fig. 3.16- Teste de independência preferencial ordinal mutua.

De acordo com a figura 3.16, tem-se a seguinte ação;

- na ordem crescente de i:

Ação $a = PVFi_{(NB)}$ e $PVFi+1_{(NB)}$; Ação $a' = PVFi_{(NB)}$ e $PVFi+1_{(NN)}$;

Ação $b = PVFi_{(NN)}$ e $PVFi+1_{(NB)}$; Ação $b' = PVFi_{(NN)}$ e $PVFi+1_{(NN)}$;

- na ordem decrescente de i:

Ação $A = PVFn_{(NB)}$ e $PVFn-1_{(NB)}$; Ação $A' = PVFn_{(NB)}$ e $PVFn-1_{(NN)}$;

Ação $B = PVFn_{(NN)}$ e $PVFn-1_{(NB)}$; Ação $B' = PVFn_{(NN)}$ e $PVFn-1_{(NN)}$;

Destas ações, os decisores escolherão suas preferências indicadas da seguinte forma: se $a P b$ (significa a preferível de b); então $a' P b'$, independentemente do nível de impacto escalar do $PVFi+1$. Assim, cumprindo-se a ordem de preferência ($a P b$) e ($a' P b'$), com todos os PVFs, independente dos níveis de impacto escalar das ações em qualquer PVF da mesma família, verifica-se a existência de Independência Preferencial Ordinal.

Para isto os testes de Independência Preferencial Ordinal, devem ser realizados, verificando-se par a par toda a família de PVFs, provocando combinações tomadas de dois em dois desde 1 até n [$C(PVFi, 2)_{i=1}^n$].

Como a independência preferencial deve ser mútua, este teste, também deve ser feito na relação inversa (ordem decrescente de $i = n$ até $i = 1$), ou seja, comparando-se o $PVFn$ em relação ao $PVFn-1$ (também representados na figura 3.16, pelas ações A, A', B, B'). Para isto realizam-se combinações par a par, em ordem decrescente (de n para 1), tomado de dois em dois [$C(PVFi, 2)_{i=n}^1$].

Cumprindo-se de forma genérica que ($A P B$) para todos os PVFs, independente dos níveis de impacto das ações " A " ou " B ", em qualquer outro PVF pertencente a essa família, e

conseqüentemente (A' P B'), verifica-se a existência de Independência Preferencial Ordinal Mútua.

Para o teste de Independência Preferencial Cardinal, utiliza-se a figura 3.17, que para o mesmo exemplo anterior, tem-se:

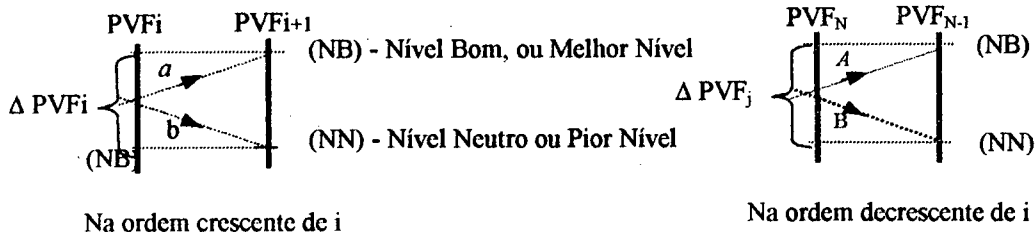


Figura 3.17- Teste de independência preferencial cardinal mutua.

Onde: $\Delta [PVFi_{(NB)} - PVFi_{(NN)}]$; significa a diferença de atratividade existente entre o PVFi no nível escalar Bom e o PVFi no nível escalar neutro. Com a mesma conotação para $\Delta [PVFN_{(NB)} - PVFN-1_{(NN)}]$; na ordem inversa (decrescente de i).

De acordo com a figura 3.17, da comparação da $\Delta [PVFi_{(NB)} - PVFi_{(NN)}]$ em relação ao escalar PVFi+1, tem-se a seguinte ação;

- na ordem crescente de i:

Ação $a = \Delta [PVFi_{(NB)} - PVFi_{(NN)}]$, é independente de PVFi+1 (NB)

Ação $b = \Delta [PVFi_{(NB)} - PVFi_{(NN)}]$, é independente de PVFi+1 (NN)

- na ordem decrescente de i:

Ação $A = \Delta [PVFi+1_{(NB)} - PVFi+1_{(NN)}]$, é independente de PVFi (NB)

Ação $B = \Delta [PVFi+1_{(NB)} - PVFi+1_{(NN)}]$, é independente de PVFi (NN)

Isto significa que a diferença de atratividade ($\Delta PVFi$), existente entre o PVFi no nível escalar Bom e o PVFi no nível escalar neutro, expressa pelo juízo de valor de um decisor, seja a mesma (independente), quando comparado aos níveis de impacto (NB) e (NN) de outro escala PVFj pertencentes à mesma família. E para que exista independência preferencial cardinal entre PVFs, deve-se cumprir que esta diferença de atratividade em um PVFi seja a mesma independentemente de qualquer que seja o nível de impacto de outro PVFj (pertencente à mesma família).

Para identificar a existência de Independência Preferencial Cardinal Mútua, deve-se testar, toda a família de PVFs, segundo combinações destes, tomados de dois em dois, de $i = 1$ até $i = n$ (ordem crescente), e de $i = n$ até $i = 1$ (ordem decrescente), verificando-se o cumprimento das ações (a e b) e (A e B), mostradas acima.

Os testes referidos verificam o cumprimento das quatro hipóteses estabelecidas pelo método MCDA, em toda a família de PVFs, ou seja, a Independência Preferencial Mútua Ordinal e a Independência Preferencial Mútua Cardinal.

3.4.4- Determinação das taxas de substituição (Pesos Relativos)

Nos itens anteriores foram exploradas as formas de como se obter a função de valor de um PVF, em função de seu descritor, e sua escala de valor de juízo numérica até ser transformada para os níveis Bom e Neutro. Também, foram realizadas baterias de testes para verificar a validade de cada PVF e seus descritores, segundo as exigências do método. Entretanto, estas escalas servem unicamente para a avaliação específica de cada fator correspondente (PVFs). Sendo assim, esta é uma escala de avaliação local.

Ao observar-se uma família de PVFs, como o exemplo da figura 3.18, nota-se que o valor global (no caso, manutenibilidade do *cluster* facilidade de desmontagem/ montagem), depende do conjunto de fatores que formam esta família. Assim, a obtenção de um valor global, que represente a avaliação conjunta dos fatores de uma família (PVFs), se conseguirá pela soma dos valores individuais (locais) de cada PVF, se afetados primeiramente dos pesos relativos correspondentes (taxas de substituição).

Para se obter a avaliação com influência global de todos os PVFs sobre um caso em análise (manutenibilidade), será utilizado o método de agregação aditiva, sendo este talvez, o mais simples e mais popular de todos os métodos utilizados na análise de multicritérios, com o qual se obtém o valor global $V(a)$, mostrado na expressão 3.1.

$$V(a) = \sum_{j=1}^n K_j \cdot V_j [g_{j(a)}]; \quad \text{com } \sum_{j=1}^n K_j = 1 \quad (3.1)$$

Onde: $V(a) \rightarrow$ é o valor global da ação (a)

$K_j \rightarrow$ é a taxa de substituição do PVF_j

$g_{j(a)} \rightarrow$ é o impacto da ação (a) no PVF_j

$V_j [g_{j(a)}] \rightarrow$ é o valor local da ação (a) segundo o PVF_j

Para aplicar a expressão 3.1 é necessário se obter as taxas de substituição de cada PVF, tema deste item.

Entende-se por peso ou taxa de substituição de um PVF, um fator de escala que em suma modula ou equaliza a contribuição de cada PVF com seu valor local $V_j(a)$, na obtenção de um valor global $V(a)$ representativo de todo o sistema avaliado. Para isto, determina-se a importância relativa de cada fator sobre o valor global, para que estas taxas ou pesos transformem valores locais em valores globais.

O modelo utilizado para a obtenção destas taxas de substituição consta de duas etapas, e para melhor visualizar o procedimento deste método, utilizar-se-á como exemplo a árvore de PVFs da figura 3.18 (retirada do *cluster* II da figura 3.3, por ser a área de interesse deste estudo), pertencente à “facilidade de desmontagem e montagem”.

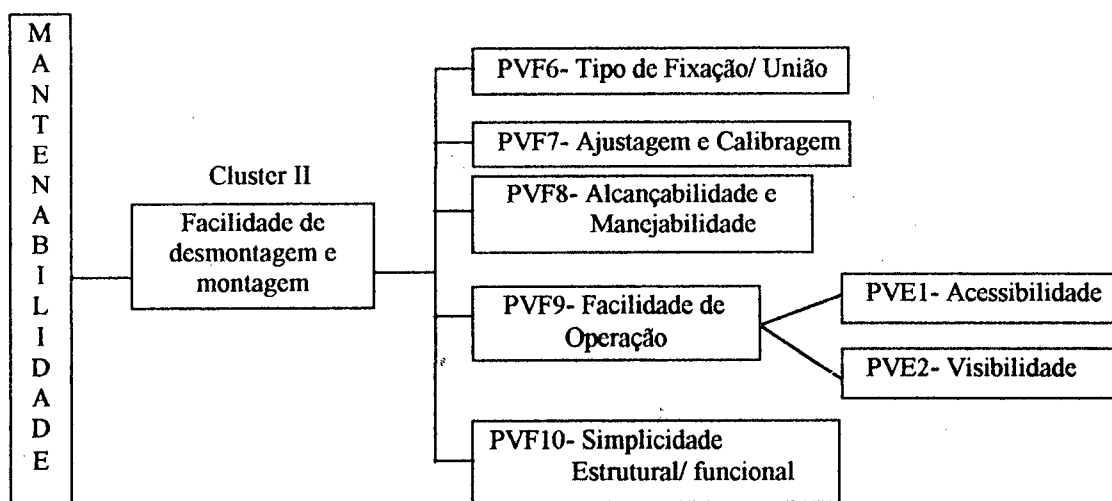


Fig. 3.18 - Árvore de PVFs Pertencente à Facilidade de Desmontagem e Montagem para Análise da Manutenibilidade.

A primeira etapa consiste em ordenar preferencialmente os PVFs de forma decrescente, numa matriz de ordenação, em função do mais atrativo para o menos atrativo (Figura 3.20).

Para isto, usa-se o recurso mostrado na figura 3.19, utilizando-se os níveis Bom e Neutro, para cada opção A ou B, para determinar a preferência nos perfis de impacto relativos em cada PVF.

Assim, a matriz de ordenação da figura 3.20, deve ser preenchida questionando-se os decisores sobre a preferência entre dois níveis de impacto (Bom e Neutro) a ser designada a cada PVF, quando tomados de dois em dois (como mostra a figura 3.19), segundo opção A ou B.

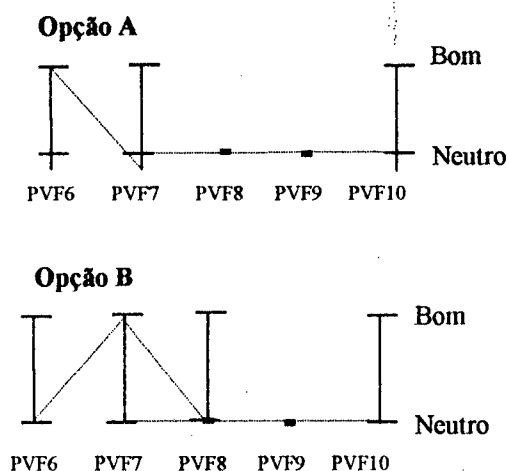


Fig. 3.19- Recurso prático para avaliar a preferência entre duas opções de perfis de impacto relativo entre PVFs para preenchimento da matriz de ordenação.

Com estas respostas, preenche-se a matriz de ordenação (Figura 3.20), nas células do cruzamento entre linha e coluna dos PVFs que estão sendo analisados, na seguinte sequência:

quando a escolha dos decisores recai na opção A, deve ser colocado o número 1 na célula da coluna $PVFi+1$ com a interseção da linha $PVFi$. Seguidamente, coloca-se o número 0 na célula da coluna $PVFi$ com a interseção da linha $PVFi+1$, ou vice-versa se a escolha dos decisores for pela opção B. Se as duas opções forem indiferentes para os decisores, deve-se colocar zero (0) em ambas as células.

Esta sequência repete-se progressivamente, sempre tomando os PVFs de dois em dois, até preencher o último par de PVFs.

	PVF6	PVF7	PVF8	PVF9	PVF10	Soma	Ordem
PVF6		1	1	1	0	3	1°
PVF7	0		0	0	0	0	5°
PVF8	0	1		1	0	2	3°
PVF9	0	1	0		0	1	4°
PVF10	0	1	1	1		3	2°
PVF6: Tipo de Fixações PVF7: Ajustagem e Regulagem PVF8: Alcançabilidade e Manejabilidade PVF9: Facilidade de Operação (Acessibilidade e Visibilidade) PVF10: Simplicidade Estrutural/ Funcional							

Fig. 3.20- Matriz de ordenação preferencial dos PVFs.

Após o preenchimento da matriz (Figura 3.20), deve-se realizar uma análise de sua consistência. Isto será visto a seguir a título de exemplo, acompanhando o seguinte processo: os PVFs empatados com a mesma pontuação devem ser desempatados, pois o método *Macbeth* exige que a ordenação dos fatores não tenha dupla posição de preferência. Esta solução pode ser conseguida de duas maneiras, ou reavaliando a matriz até conseguir o desempate, ou reaplicando a matriz individualmente aos grupos de fatores com a mesma pontuação, desfazendo-se o empate. Com esta última forma de solução mais rápida (o desempate), a nova pontuação dos fatores refaz-se obedecendo ao seguinte critério:

o fator na primeira posição do desempate fica ocupando a posição original que gerou este processo, os fatores restantes que lhe seguem, vão se reordenado nas posições subseqüentes, provocando um deslocamento de todos os fatores sucessivos na ordem decrescente, nas posições de preferência.

Com este processo, aplicado sequencialmente (de forma decrescente) a cada grupo de PVFs empatados com o mesmo valor, consegue-se o desempate com a ordenação total dos fatores (PVFs) em posições únicas, objetivo desta matriz.

Todavia, pode acontecer que um grupo de PVFs empatado não consiga seu desempate por que os decisores entendem que todos por igual merecem a mesma preferência ou pontuação. Esta situação deve ser resolvida, por que como já foi dito, o método não aceita fatores com a mesma preferência. Esta solução pode ser procurada de três maneiras:

- juntando-se os fatores num único fator (por ser da mesma preferência), arrumando-os na forma de subfatores (PVEs);

- com seus correspondentes pesos (um fator dependente de outro, PVF e PVE);
- negociar com o grupo de decisores um desempate entre eles.

Outra análise que esta matriz permite realizar é quanto a PVFs avaliados com atratividade neutra (zero) em todas as células. Esta condição poderia significar que os referidos pontos tem pouca relevância na condição de fator de avaliação de uma ação ou evento, assim poder-se-ia reavaliar sua condição para ser parte ou não da família de fatores analisados. Ou também, durante a avaliação poder-se-ia discutir a validade de algum fator por se achar que não pertença à família em estudo e, portanto deva ser excluído do grupo em análise.

Como pôde ser visto, esta matriz de ordenação, cumpre também a função de filtro, selecionando os verdadeiros PVFs segundo juízo dos decisores, auxiliando assim a análise de escolha dos verdadeiros fatores e expondo de forma mais detalhada a contribuição de cada PVF para a missão desejada.

Assim, para o exemplo utilizado, após as modificações que se mostraram necessárias em função da matriz de ordenação, os fatores arrumados hierarquicamente de forma decrescente, são mostrados na figura 3.22.

A segunda etapa consiste em resolver a matriz de juízos de valor que se inicia com a construção desta matriz em que será aplicado o método de *Macbeth*, semelhante ao processo utilizado para a construção da função de valor dos PVFs, vista no item 3.4.3. Por este motivo aqui serão mostradas unicamente as diferenças com relação ao que já foi descrito anteriormente.

Na solução desta matriz (ordenada hierarquicamente de forma decrescente nas linhas e colunas, figura 3.22), existem duas diferenças com respeito à matriz da figura 3.9, utilizada para determinar a função de valor dos descritores. Uma destas diferenças está na necessidade de introduzir mais um fator (Ao) correspondente a uma ação de referência fictícia, para que não sejam perdidas as informações do PVF que ficarem na última posição hierárquica. Para isto, a ação de referência fictícia (Ao), possui todos os impactos de atratividade no nível neutro ou zero (ver figura 3.21).

A outra diferença está no mecanismo de avaliação dos níveis de impacto para cada PVF já ordenados hierarquicamente, quando comparados de dois em dois segundo duas possíveis opções A e B (mantendo-se no nível neutro todos os restantes PVFs). Neste caso, muda-se o tipo de questionamento ao decisor, sendo agora indagado para responder:

entre duas ações A e B (segundo figura 21), onde a opção (A) esta formada pelos PVF1 (NB) - PVF2 (NN) e a opção (B) pelos PVF1 (NN) - PVF2 (NB): Qual o nível de atratividade (escala *Macbeth*, figura 3.8) entre as opções A e B?

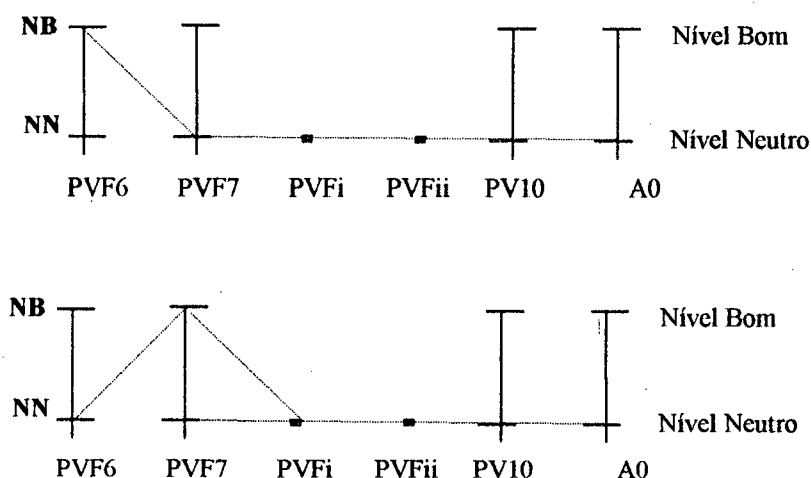


Fig. 3.21- Recurso prático para avaliar o nível de atratividade entre duas opções de perfis de impacto relativo entre PVFs para preenchimento da matriz de *Macbeth*.

Ao responder-se a este questionamento, com uma das categorias C_i dos juízos de valor da figura 3.8, as células da matriz são preenchidas com o número do subíndice “ i ” correspondente. Concluído o preenchimento da matriz, esta é resolvida pela metodologia *Macbeth*, conforme já apresentado anteriormente.

Na figura 3.22, mostra-se o resultado do preenchimento da matriz de juízos de valor, que será calculada segundo metodologia *Macbeth* através do seu *software* específico (BANA E COSTA; CORTE; VASNICK, 1997). Mostra-se, também, a escala de categorias semânticas de atratividade da figura 3.8, utilizada para o preenchimento desta matriz.

A solução desta matriz (verificadas e resolvidas todas as inconsistências cardinais e semânticas apresentadas) dará como resultado uma escala de valor cardinal, que representa numericamente o julgamento de valor do decisor das ações correspondentes.

Ordem		1	2	3	4	5	6
		PVF6	PVF10	PVF8	PVF9	PVF7	A0
1	PVF6		1	2	3	4	5
2	PVF10			1	2	3	4
3	PVF8				1	2	3
4	PVF9					2	2
5	PVF7						2
6	A0						
1- PVF6: Tipo de Fixações/ União 2- PVF10: Simplicidade Estrutural/ Funcional 3- PVF8: Alcancabilidade e Manejabilidade 4- PVF9: Facilidade de operação (Acessibilidade e Visibilidade) 5- PVF7: Regulagem e Calibragem 6- A0: Fator de Referência				Escala de Atratividade C0 - Indiferença C1 - Muito fraca C2 - Fraca C3 - Moderada C4 - Forte C5 - Muito forte C6 - Extrema			

Fig. 3.22- Matriz de *Macbeth* preenchida com os juízos de valor segundo atratividade para determinar as taxas de substituição dos PVFs.

Com a solução da matriz anterior, as taxas de substituição dos PVFs são calculadas através da normalização da escala de valor obtida por *Macbeth* (Figura 3.23), dividindo o valor obtido para cada PVF, pelo somatório dos valores que formam esta escala cardinal, segundo a expressão 3.2.

$$K_j = \frac{V(PVF_j)}{\sum_{j=1}^n V(PVF_j)} \cdot 100$$

(3.2)

A figura 3.23, mostra a escala de valor cardinal obtida através do *software* de *Macbeth* juntamente com as taxas de substituição calculadas.

	PVF	Peso	Escala de Valor	Taxa de Substituição
1	PVF6	P1	100	31,48
2	PVF10	P2	82,35	25,93
3	PVF8	P3	64,71	20,37
4	PVF9	P4	47,06	14,81
5	PVF7	P5	23,06	7,41
TOTAL			644.61	100

Fig. 3.23- Exemplo de Escala de valor cardinal e taxas de substituição dos PVFs.

A figura 3.24 mostra um exemplo de árvore de PVFs da Manutenibilidade, correspondente à facilidade de desmontagem e montagem, com seus correspondentes pesos relativos.

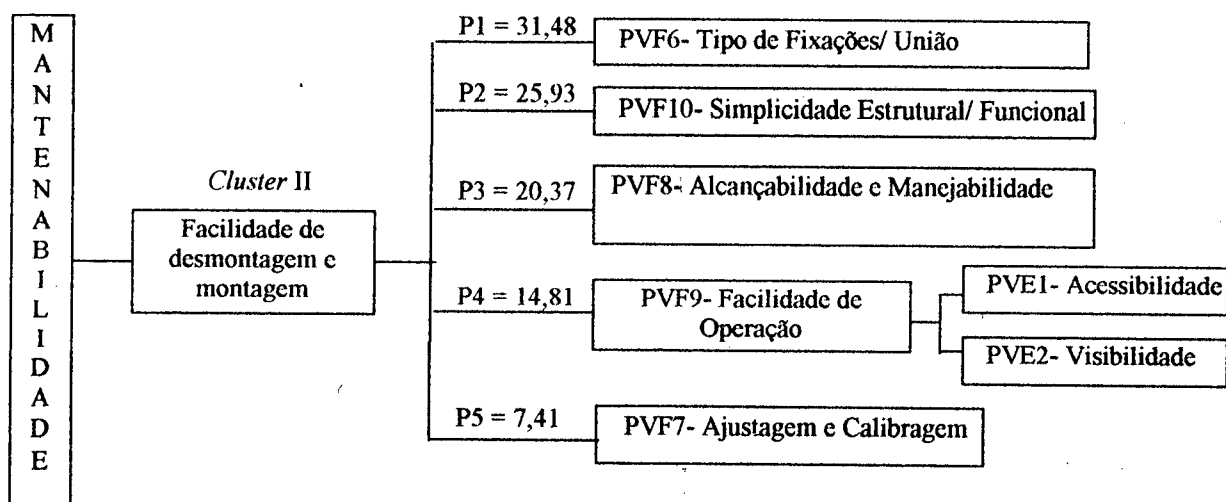


Fig. 3.24 – Exemplo de Árvore de Fatores (PVFs) de Manutenibilidade com seus Pesos Relativos.

Determinadas as taxas de substituição (pesos relativos) de cada PVF, poder-se-á calcular o valor global de atratividade sobre a ação principal ou estratégica da árvore de fatores (que no caso do exemplo apresentado correspondente à atividade de desmontagem e montagem), aplicando-se a expressão (3.1) de agregação aditiva, com os valores locais de atratividade de cada PVF.

Para esta avaliação global, deverão ser obtidos os níveis de impactos das ações potenciais sobre cada PVF (valor local ou parcial), aplicando-se as funções de valor e taxas de substituição obtidas para o modelo de avaliação, a um caso específico (no caso deste trabalho desmontagem/montagem de produtos/sistemas mecânicos). Assim, aplicando-se as escalas de valor obtidas, se escolherá um nível de impacto V_j (valor local) para cada PVF, segundo juízo do decisor (avaliador), e com estes valores determina-se o valor global $V(a)$ (segundo expressão 3.1), aplicando-se as taxas de substituição $K(j)$ correspondente a cada PVF.

3.4.5- Análise de Sensibilidade do Modelo

Esta análise é realizada para examinar se o modelo é robusto a alterações de seus parâmetros. Nesta análise é possível detectar o quanto a variação do valor de impacto de um determinado PVF modifica a avaliação global do sistema pela agregação aditiva do conjunto de PVFs. quando afetados de suas taxa de substituição.

Isto é necessário conhecer por que é comum a necessidade de se fazer ajuste do modelo, executando-se modificações de valor em alguns dos parâmetros, e com esta análise estar-se-á preparado para corrigir a influência no sistema de avaliação como um todo. Assim, procura-se que o modelo se comporte de forma robusta, ou seja, pouco sensível a pequenas modificações de valor em determinados fatores (PVF), sem modificação sensível no valor global do conjunto de fatores avaliados no sistema.

Neste processo, a análise de sensibilidade se torna compulsória sobre os valores locais obtidos em cada PVF, pela aplicação das escalas de valor do modelo, verificando sua influencia no valor global de avaliação. Isto se justifica porque o juízo de valor dos decisores para obter as funções de valor é cognitivo, e como tal os valores determinados nas escalas do modelo devem ser encarados como aproximações, portanto, tais parâmetros de avaliação representam, na verdade, faixas de valores e não pontos. Frente à possibilidade de variação das escalas de avaliação (por ajustes desejados), vem a necessidade da análise de sensibilidade ou robustez, das escalas do modelo obtido, através dos valores de impacto (V_i) de cada PVF_j, encontrados na avaliação de um caso específico ou criados por simulação hipotética.

Entre os parâmetros que podem influenciar de forma muito forte o modelo em caso de reajustes, está a taxa de substituição (peso). Assim, o modelo deve apresentar-se estável neste

quesito, permitindo variações de até $\pm 10\%$ (ENSSLIN, 1998), sem ocasionar grandes modificações no valor global de avaliação. Caso contrário, o modelo exige ser reavaliado para se conseguir esta particularidade.

Neste item será mostrado o procedimento para modificar o peso de um fator, e como consequência, o recálculo dos pesos nos demais fatores, para que o modelo de avaliação conserve sua igualdade sobre o valor global do sistema.

Relembrando que:

$$p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i = 1$$

Pode-se escrever a (3.3), que permite recalcular o peso de n fatores:

$$p'_n = \frac{p_n \cdot (1 - p'_i)}{(1 - p_i)} \quad (3.3)$$

Onde: p'_n = Peso recalculado do fator n

p_n = Peso original do fator n

p'_i = Peso recalculado do fator i

p_i = Peso original do fator i

A expressão (3.3) para recálculo de pesos ou taxas de substituição, pode ser demonstrada (ENSSLIN, 1998).

Agora, suponha-se modificar, por exemplo, o peso do fator 1, assim a modificação dos outros fatores se faz com:

$$p'_2 = \frac{p_2 \cdot (1 - p'_1)}{(1 - p_1)} ; \quad p'_3 = \frac{p_3 \cdot (1 - p'_1)}{(1 - p_1)} ;$$

Até recalcular o último fator:

$$p'_n = \frac{p_n \cdot (1 - p'_1)}{(1 - p_1)}$$

Esta análise de sensibilidade, também poderá ser realizada através de métodos gráficos específicos para este fim, como o programa *HIVIEW* (BARCLAY, 1984), ou qualquer outro programa com capacidade de desenhos gráficos como o EXCEL. O software *HIVIEW* serve como instrumentos para a definição, análise, avaliação e justificação de decisões complexas, permitindo ao decisor examinar prováveis modificações da escolha, no processo de

juízo, tornando os resultados obtidos mais confiáveis e precisos. Estes métodos computacionais oferecem maior rapidez e simplicidade de execução, comparados ao método de cálculo numérico.

O método de análise de sensibilidade, através do *software HIVIEW*, realiza-se de forma gráfica modificando o peso em um dos fatores (PVF), com variação em toda sua faixa de valor (0 a 100), e através de ferramentas do programa, pode-se verificar no gráfico gerado, como se comporta a variação do valor global correspondente à agregação aditiva de todos os PVFs, para um determinado ponto do valor de escala, como por exemplo, Bom e Neutro, em cada descritor (PVF) de avaliação. Se a variação no valor global comporta-se dentro da margem do mesmo valor praticado no peso do fator, pode-se afirmar que o modelo é robusto (pouco sensível a variações de cada fator). Caso contrário, as escalas de valor devem ser reavaliadas. Este mecanismo de teste de variação de valor no peso do fator deve ser realizado em todos os PVFs do modelo. Outra verificação importante seria detectar pontos do gráfico *HIVIEW* onde o valor global das alternativas de avaliação analisadas se igualem ou invertam a posição de grandeza (maior / menor), indicando assim forte instabilidade das escalas utilizadas por mudar o significado de interpretação de avaliação.

Os gráficos elaborados pelo programa nas condições mencionadas acima mostram na abscissa a variação de 0 a 100 do peso (taxa de substituição) dos PVF que estão sendo analisados, e na ordenada a variação de 0 a 100 do valor global, resultado da agregação aditiva de todos os fatores, quando afetados da taxa de substituição. As retas representam a função do valor global desta agregação.

Abordou-se neste capítulo o ferramental a ser utilizado para desenvolvimento deste trabalho, justificando sua escolha e mostrando-se os passos a serem seguidos para sua solução. Entre os pontos mais relevantes destacam-se: o procedimento para construção das funções escalares, as taxas de substituição para agregação aditiva dos valores individuais de cada fator e a análise de sensibilidade através do *HIVIEW*. No Capítulo 4 serão descritas as fases necessárias para o desenvolvimento do modelo que permitirá a obtenção do índice de manutenibilidade, proposta deste estudo.

CAPÍTULO 4 - MODELO PARA AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE MANTENABILIDADE

Neste capítulo descreve-se, passo a passo, o desenvolvimento do modelo objeto deste trabalho, devidamente justificado, juntamente com as condições necessárias e/ou desejáveis para sua aplicação.

4.1- Apresentação do Modelo

Nas pesquisas bibliográficas, realizadas em nível nacional e internacional, constam trabalhos sobre análise de manutenibilidade, cujas linhas de abordagem são resumidas no item 2.4. Partindo-se deste levantamento, traçou-se a pretensão para uma nova abordagem na análise de características de manutenibilidade, que será utilizada nesta pesquisa.

O estudo consistirá em desenvolver um método de avaliação escalar (quantitativo) das características de manutenibilidade (indicadores), que estejam relacionadas às atividades de desmontagem e montagem para manutenção.

Com as características de manutenibilidade selecionadas como indicadores do modelo, construir-se-ão as funções de valor, através do método de Análise de Multicritérios em Apoio à Decisão - MCDA, descrita no Capítulo 3. As funções obtidas serão os instrumentos de escala do modelo que avaliam os indicadores de manutenibilidade e, através destes valores, determinar os índices de manutenibilidade dos componentes/ conjuntos do produto avaliado.

Os parâmetros a serem obtidos pelo modelo definem-se como:

- valor de manutenibilidade (V), a magnitude que representa o valor escalar dos indicadores de manutenibilidade;
- valor parcial de manutenibilidade (SIm), a magnitude que representa o valor ponderado da família de indicadores de manutenibilidade avaliadas sobre um item do projeto;
- valor local de manutenibilidade (Im), que avalia o valor médio da manutenibilidade (resultado da média geométrica dos SIm), sobre um componente ou conjunto;
- valor global de manutenibilidade (Img), ao valor numérico obtido de uma expressão desenvolvida neste trabalho, que correlaciona o valor local de manutenibilidade (Im), em cada componente/ conjunto com a frequência (F) de manutenção.

Estes índices, parcial, local ou global, representam uma magnitude relativa de manutenibilidade, escalarizada entre um valor mínimo e máximo (de 0 a 100), ponderado do conjunto de indicadores de manutenibilidade contidos em cada item/ componente/ conjunto do produto/ sistema avaliado.

Os valores obtidos para cada indicador e os índices de manutenibilidade permitem analisar o projeto de produtos/ sistemas em desenvolvimento ou já existentes, de forma comparativa, através da magnitude relativa apresentada em cada versão de projeto, detectando pontos fortes e fracos de manutenibilidade, para escolha ou priorização de melhorias em função das necessidades especificadas e/ ou exigidas em cada caso.

Assim, a avaliação quantitativa da manutenibilidade proporciona uma referência para análise comparativa (menor/ maior), dos itens avaliados entre diferentes alternativas de projeto. Todavia, uma análise complementar deve ser realizada através da correlação entre outras variáveis de referência, como valor de ganho da facilidade de manutenção que a característica proporciona ao projeto, valor de ganho no custo do ciclo de vida do produto e custo do produto, entre outros.

O valor de ganho da facilidade de manutenção é representado, principalmente, através do tempo médio de intervenção ou reparo (MRT), e disponibilidade operacional. O custo do produto representa o valor agregado, necessário para incorporar as características de manutenibilidade no produto/sistema. O valor de ganho, no custo de ciclo de vida, é medido através dos índices de avaliação de desempenho do produto/ sistema durante o tempo de ciclo de utilização (ver expressão 2.3 e 2.4).

Com este modelo de avaliação pretende-se auxiliar, especificamente, as fases 4, 5 e 6 do ciclo do processo de análise para projeto de manutenibilidade, da figura 2.8 e as fases 3, 4 e 5 para reforma e melhoramento da manutenibilidade em produtos existentes, da figura 2.9.

Na figura 2.12 foram mostrados os diferentes temas de estudo que podem ser abordados com este modelo de análise de manutenibilidade, podendo ser tratados produto/sistema, processo, mão-de-obra, organização ou logística. Todavia, considerando-se como foco de estudos a manutenibilidade de produtos/sistemas, este pode ser desenvolvido para atividades de diagnóstico, lubrificação, manutenção preventiva/ preditiva, limpeza, *set-up*, desmontagem/montagem; sendo esta última o foco do presente estudo.

Assim, o principal objeto de estudo deste trabalho refere-se às características de manutenibilidade no projeto. Estas características, (definidas no item 2.2) são representadas através de fatores ou indicadores intrínsecos e extrínsecos de um sistema de manutenção, que definem as performances de desempenho do produto em termos da facilidade apresentada nas atividades de manutenção (recursos exigidos), tempos de intervenção (MRT), previsibilidade dos tempos estimados $M(t)$, taxas de reparo (μ), custo de ciclo de vida, qualidade, entre outros.

Conforme o visto, estes indicadores devem ser tratados como integração do sistema de manutenção (produto, processo, instalação, organização, mão de obra, logística, etc.), em que cada um destes itens pode ser estudado, segundo ramos de especificidade como facilidade de desmontagem/ montagem, facilidade estrutural, facilidade de detecção de falhas, lubrificação, limpeza, etc (ver figura 2.12).

Pelo prisma desta integração sistêmica, poderiam ser considerados outros itens como parte integrante do sistema de manutenção, tais como: meio ambiente, fornecedores, clientes entre outros, entretanto não se pretende abordá-los neste estudo.

Assim, este trabalho focaliza a obtenção de um índice pela análise e avaliação quantitativa dos indicadores de manutenibilidade, para as atividades de desmontagem/ montagem em manutenção de produto/ sistema do tipo mecânico.

Este modelo de avaliação pode ser aplicado tanto na fase de projeto como em produtos/ sistemas existentes, e busca auxiliar a tomada de decisões para a procura de:

- o melhor projeto para atividades de desmontagem e montagem em manutenção, considerando-se os valores de manutenibilidade de cada indicador, e os índices local e global obtidos para cada opção de projeto;

- menores tempos de intervenção na manutenção;
- melhor valor estatístico de manutenibilidade $M(t)$ para previsão de tempos de parada planejada em manutenção;
- menores custos de ciclo de vida de produtos/sistemas.

A descrição para desenvolvimento deste modelo será dividida em duas partes independentes:

A primeira parte, descreve a escolha dos indicadores de manutenibilidade e a aplicação da ferramenta MCDA para obtenção das escalas de valor a serem utilizadas pelo modelo, como instrumentos de avaliação escalar dos indicadores, juntamente com as taxas de substituição, a serem aplicadas na agregação aditiva do conjunto de valores obtidos para cada indicador.

A segunda parte desenvolve o procedimento para se obter os índices de manutenibilidade parcial, local e global correspondentes a componentes/ conjuntos e produto/ sistema.

A figura 4.1 mostra uma simulação das diferentes etapas que serão abordadas no desenvolvimento do modelo dedicado à avaliação dos indicadores de manutenibilidade, em atividades de desmontagem e montagem para manutenção de sistemas mecânicos, utilizando-se como exemplo os indicadores apresentados na figura 3.18, e a figura 4.2 mostra a sequência a ser seguida no desenvolvimento do modelo.

Após a apresentação das figuras, passa-se a desenvolver a primeira parte que corresponde à seleção dos indicadores do modelo e aplicação do MCDA para obtenção das escalas de valor e suas taxas de substituição.

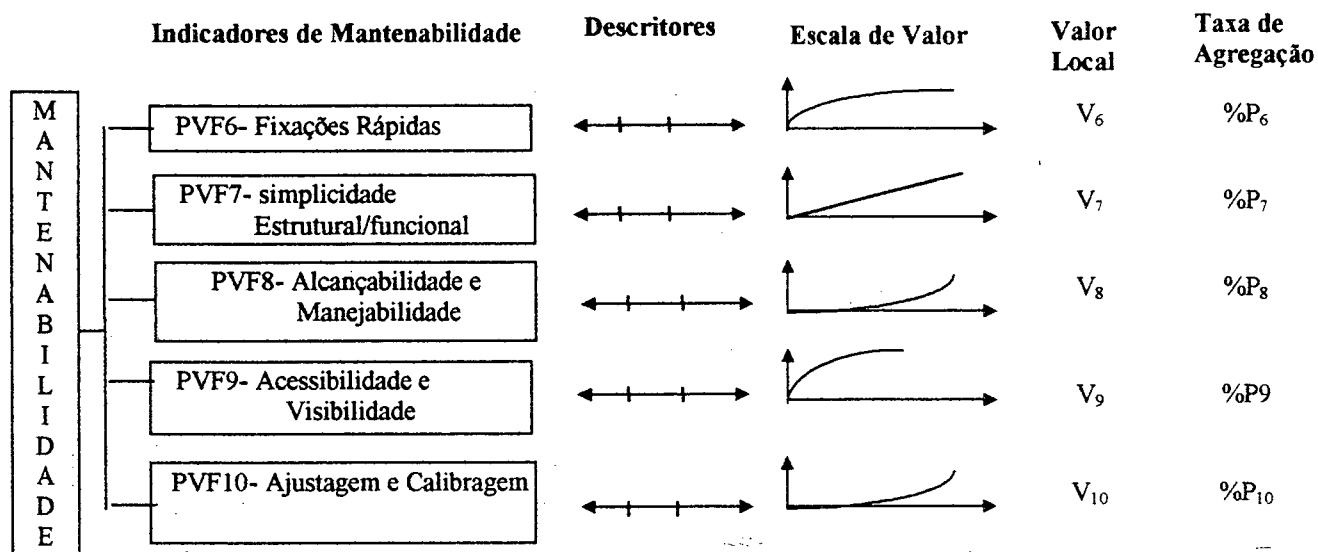


Fig. 4.1- Simulação das diferentes etapas de desenvolvimento do modelo proposto.

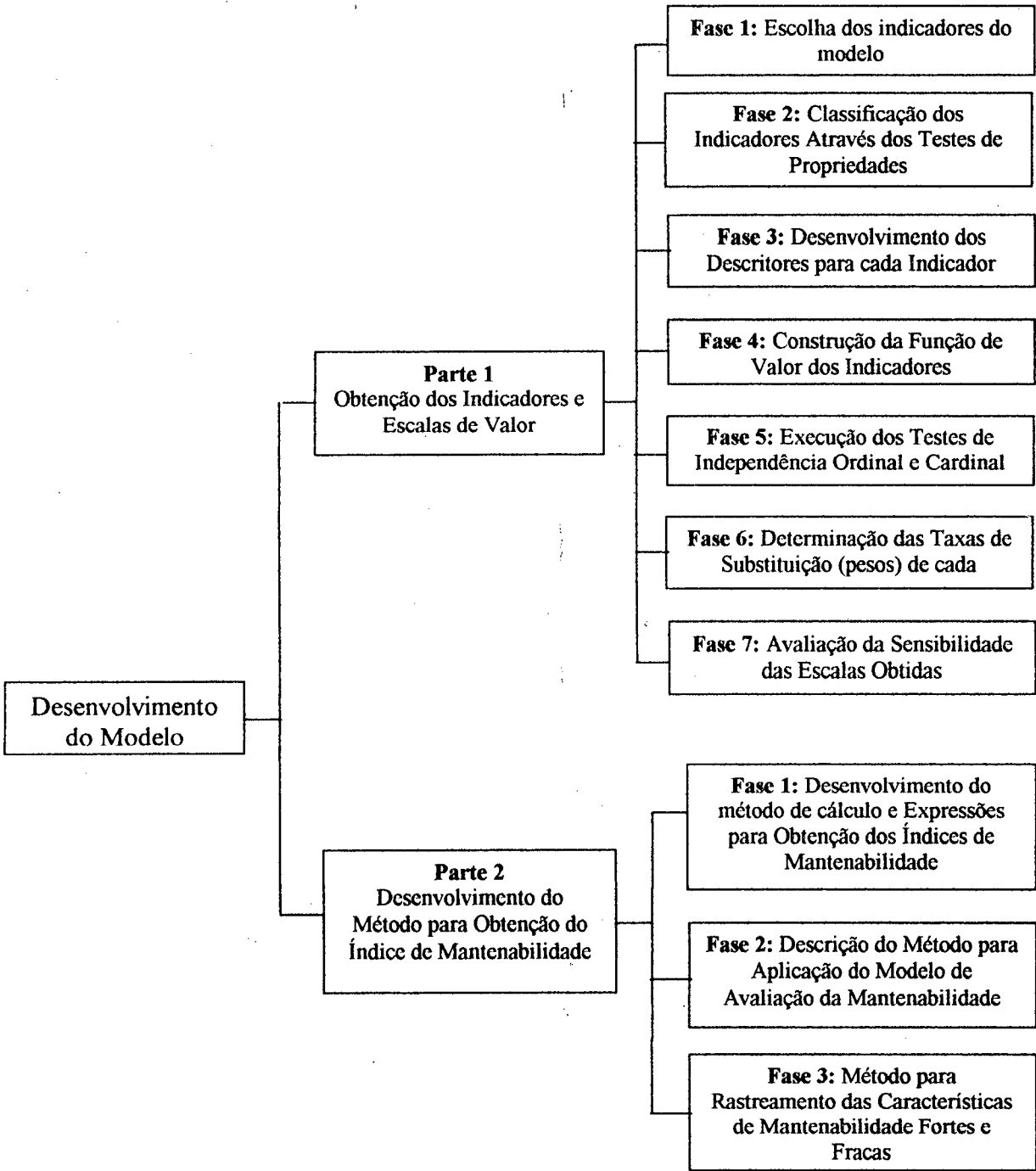


Fig. 4.2- Sequência a ser seguida para desenvolvimento do modelo.

4.2- Parte 1: Determinação das Escalas de Valor a Serem Utilizadas pelo Modelo

Neste item será descrito o desenvolvimento para obtenção das Escalas de valor do modelo, com a sequência a ser seguida na aplicação do MCDA, para construção das funções

escalares, que serão utilizadas como instrumento para avaliar os indicadores, e as taxas de substituição para a agregação aditiva de valores do conjunto dos indicadores avaliados.

Como a abordagem utilizada será a mesma descrita no Capítulo 3, muitas informações não serão repetidas neste item, entretanto algumas adaptações foram desenvolvidas para adequar a aplicação do método ao problema da pesquisa, que serão comentadas em cada tópico abordado.

A seguir apresentam-se os itens com o desenvolvimento na sequência de sete fases correspondentes à primeira parte da figura 4.2.

4.2.1- Fase 1: Escolha dos Indicadores de Manutenibilidade

O modelo MCDA estabelece que os fatores de análise, também, chamados de pontos de vista fundamentais (PVFs), devem ser procurados através de um decisor.

Foi definido como decisor (Capítulo 3) a pessoa encarregada de fixar os critérios e juízos de avaliação que o método exige, de forma subjetiva. Este decisor, na prática, é escolhido ou por que é o interessado no problema, ou por que é um especialista do produto/sistema a ser avaliado.

Neste estudo, a aplicação do método MCDA se realiza utilizando três decisores (mecânicos com curso técnico de nível médio), cujo nível de conhecimento e habilidades satisfaz a pretensão do estudo (ver item 3.4.1). A opção de se trabalhar com mais de um decisor baseia-se na pretensão de se obterem características de valor do assunto, em estudo, as mais representativas possíveis da realidade ou aceitação majoritária. Para isto, o método será aplicado individualmente a cada decisor, e depois os resultados serão agregados num valor final, através de uma análise de equalização do facilitador.

O personagem de facilitador, para o estudo, será o próprio autor do trabalho e, segundo definido no Capítulo 3, tem a função de intervir no processo de forma variável, cumprindo um papel duplo no processo, servindo, por um lado, de suporte para a comunicação entre os atores e/ou decisores e por outro, de guia para a elaboração, justificação e transformação dos juízos de valor apresentados pelos mesmos.

A procura, especificação e escolha dos indicadores de manutenibilidade se realiza em duas etapas. Na primeira, coletando-se na bibliografia especializada, todo o espectro abordado

sobre os fatores que representem, de forma intrínseca e extrínseca, as características de manutenibilidade. Após este levantamento, o facilitador complementarà a listagem preliminar de fatores, através de sua experiência e informações adquiridas na pesquisa bibliográfica (ver item 2.2 e 2.2.1).

Na segunda etapa, o facilitador expõe, para análise dos decisores, a lista de fatores confeccionada na primeira etapa, e estes estudarão, analisarão, testarão e complementarão, se necessário, a referida lista de fatores. O mapa cognitivo (ENSSLIN, 1998), também, será utilizado como ferramenta neste processo (ver item 3.4.1).

Os elementos obtidos nestas duas etapas chamar-se-ão de elementos primários de avaliação, que servirão para selecionar e especificar os indicadores de manutenibilidade que interessam (PVFs definitivos), para serem utilizados no modelo a ser desenvolvido.

Nestas etapas de seleção de candidatos a indicadores para o trabalho, deve-se destacar que existe uma particularidade com respeito ao processo convencional utilizado pela metodologia MCDA. Esta particularidade refere-se à forma de como são selecionados estes candidatos. No processo normal, (comentado no item 3.4.1) utiliza-se o mapa cognitivo como ferramenta principal. Já neste trabalho, devido aos fatores de manutenibilidade serem apresentados pela maioria das bibliografias que tratam do assunto, utilizar-se-á o mapa cognitivo como ferramenta auxiliar de análise, descoberta, seleção e complementação destes indicadores.

Apesar de a listagem de indicadores clássicos, oferecidos pelas bibliografias da área de estudo de manutenibilidade, serem consideráveis, houve necessidade de uma complementação e adaptação para desenvolver este estudo, o que resultou em mais uma contribuição (ver item 2.2 e 2.2.1).

Para selecionar os indicadores que serão utilizados pelo modelo, na obtenção do índice de manutenibilidade, lembra-se que o objetivo do trabalho propõe um modelo a ser aplicado na avaliação de produtos/ sistemas mecânicos, para atividades de desmontagem e montagem na manutenção.

Assim sendo, do espectro de indicadores mostrados no item 2.2, e da agrupação por áreas específicas praticada nos itens 2.2.1 e 3.4.1.2 pode-se extrair o grupo de indicadores

candidatos (Ii), pertencentes à área que interessa neste trabalho (facilidade de desmontagem e montagem), mostrado na figura 4.3.

Indicadores de Manutenibilidade para Facilidade de Desmontagem e Montagem	
1	Tipo de Fixação/ União
2	Ajustagem e Calibragem
3	Simplicidade Estrutural/ Funcional
4	Acessibilidade e Visibilidade
5	Alcançabilidade e Manejabilidade

Fig. 4.3- Família de indicadores candidatos pertencentes à facilidade de desmontagem/ montagem para manutenção.

Determinados os candidatos a indicadores de manutenibilidade (I_i), estes, ainda, serão testados para verificar se atendem às características e propriedades que o método exige. Após isto, poderão ser aceitos de forma definitiva. Estes testes serão mostrados no próximo item.

Quanto à seleção dos verdadeiros indicadores de manutenibilidade, cabe lembrar (pelo visto no item 3.4.4) que a fase de hierarquização destes fatores, necessários para determinar a taxa de substituição, também se comporta como instrumento para verificar a autenticidade dos mesmos.

4.2.2- Fase 2: Teste de Propriedades que Devem Cumprir os Indicadores (Ii)

Os testes a serem aplicados aos candidatos a indicadores de manutenibilidade (I_i), para verificar o cumprimento de propriedades que devem satisfazer, segundo o método MCDA, são realizados através de uma bateria de testes adaptados do item 3.4.1.1.

A bateria da figura 4.4 classifica os indicadores que forem aptos para sua função, e apresenta-se como um resumo de todas as exigências e propriedades que devem cumprir os indicadores classificados. Caso em que uma única condição não seja satisfeita, o mesmo será desclassificado. Assim, o procedimento para aplicação desta bateria será direto e auto-

explicativo, detalhando-se unicamente as justificativas dos indicadores que não tenham cumprido qualquer exigência referida.

Essencial	Representar os valores ou aspectos importantes ou fundamentais do que se quer medir.
Controlável	Avaliar única e exclusivamente os valores ou aspectos do contexto que está sendo analisado.
Completo	Fornecer todos os aspectos relevantes aos olhos do decisor, ou seja, conter todos os aspectos relevantes para uma análise de valor representativa.
Conciso	Ser reduzido somente ao necessário para permitir a avaliação desejada. Mas da mesma forma deve ser completa.
Mensurável	Permitir uma definição precisa e permitir especificar os vários graus ou níveis de influência
Operacional	Permitir obter informações necessárias para relacionar as várias ações com suas possíveis conseqüências, bem como informações de valor que permitam especificar a atratividade relativa destas conseqüências em termos de valor de referência.
Independência	Ter independência preferencial ordinal e cardinal; quer dizer ser independentes das influências relativas de outros PVFs.
Não redundantes	Não existir dupla avaliação dos aspectos analisados, ou seja, não considerar o mesmo aspecto por mais de um PVFs.
Inteligível	Permitir uma descrição clara e não ambígua para que diferentes pessoas possam associar ou interpretar um mesmo nível de impacto na ação analisada.

Fig. 4.4- Bateria de exigências a serem cumpridas pelos candidatos a indicadores de manutenibilidade.

À família de indicadores selecionada (Figura 4.3), foi aplicada a bateria de testes da figura 4.4, satisfazendo plenamente todos os requisitos, estando assim classificados como indicadores de manutenibilidade definitivos. O Anexo J mostra a aplicação da bateria de testes para cada indicador (I_i).

Determinados os indicadores a utilizarem-se no modelo, serão representados através de um gráfico de arborescência, formando ramos de fatores hierarquicamente dependentes, como visto no item 3.4.1.2, figura 3.3. Isto facilita a visualização conjunta dos indicadores, aumentando a compreensão sobre o contexto representado, e facilitando o consenso entre as pessoas que o analisam, pois o mesmo apresenta uma estrutura única para o problema que representa, facilitando a análise conjunta dos indicadores (I_i).

Assim, os indicadores classificados podem ser dispostos, segundo área (*cluster*) de interesse ou especificidade, isto é: facilidade de desmontagem e montagem para manutenção.

Cada área está ligada à cabeça da árvore ou objetivo estratégico e principal do estudo, que é a manutenibilidade.

A figura 4.5 mostra a árvore que representa a família de indicadores de manutenibilidade a ser utilizada no desenvolvimento do modelo.

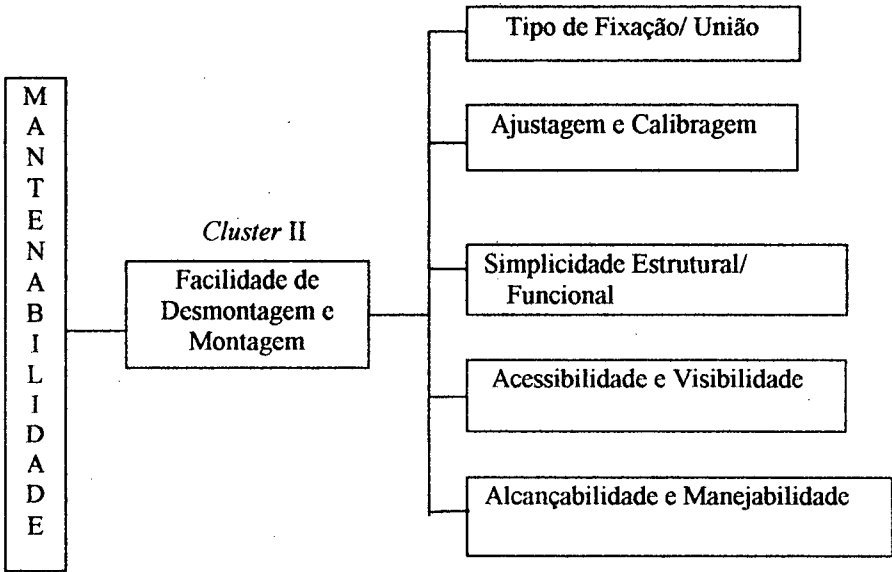


Fig. 4.5- Árvore da família de indicadores pertencentes à facilidade de desmontagem e montagem para manutenção.

A seguir desenvolve-se a fase 3 que corresponde à construção dos descritores.

4.2.3- Fase 3: Definição e Construção dos Descritores Correspondentes aos Indicadores (Ii)

Como já visto no item 3.4.2, os descritores são definidos como: o conjunto de níveis que servem de base ou referência para descrever os possíveis juízos de valor ou níveis de impactos aos quais, os indicadores de manutenibilidade (I_i) poderão ser associados em função do estado ou condição apresentada para cada caso em particular.

Para definir e construir os descritores de cada indicador se estabelecem os passos indicados na figura 4.6.

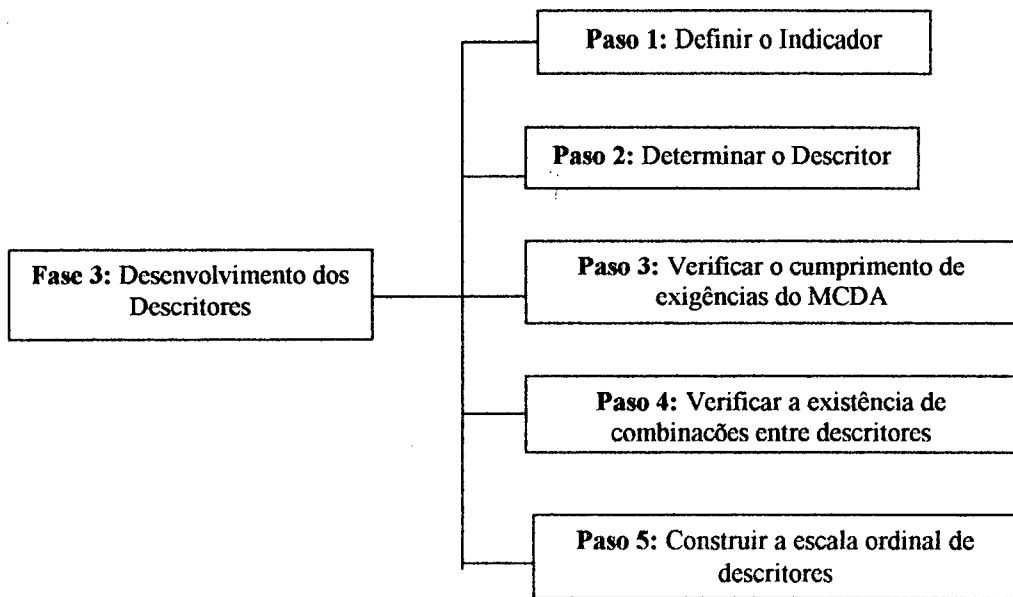


Fig. 4.6- Sequência dos passos para construção dos descritores

Os cinco passos indicados na figura 4.6 são descritos a seguir.

1º passo: Definir o Indicador. A definição dos indicadores é ponto de partida para a construção dos descritores de avaliação, pois são estes que tornam os fatores mensuráveis de forma quantitativa, a partir dos quais é construída a escala de juízos de valor para cada indicador de manutenibilidade. Estas definições foram apresentadas no item 2.2;

2º passo: Determinar o Descritor. A determinação do descritor de cada indicador consiste em estabelecer os níveis de impacto escalares, através de expressões semânticas, aplicando-se o mapa cognitivo junto aos decisores, para especificar a que tipo pertencem os níveis de impacto do descritor a ser escolhido para cada indicador (Diretos e Indiretos, Naturais ou Construídos). É muito importante lembrar que a escolha do tipo de nível de impacto dos descritores há de ser correta, pois se houver qualquer inversão nesta escolha, do tipo, utilizar-se Descritor Direto Natural onde corresponder Descritor Indireto Natural ou vice versa, o modelo poderá ocasionar avaliações erradas. Cabe salientar que, de preferência, a quantidade de níveis de impacto de um descritor deve ser o menor possível, isto porque um grande número de níveis prejudica a precisão no julgamento de valores, por parte dos decisores, pois obriga a tratar ao mesmo tempo um maior número de variáveis semânticas. Segundo Bana E Costa et al. (1995) “a capacidade de análise de uma pessoa normal está em torno de sete informações e/ou variáveis de forma simultânea”;

3º passo: Verificar o cumprimento de exigências do MCDA. Para o cumprimento das exigências básicas a serem cumpridas pelos descritores de cada indicador deve-se verificar se a escolha do descritor e seus níveis de impacto atendem às exigências do método MCDA, as quais estão apresentadas na figura 4.7 em forma de bateria (adaptadas do item 3.4.2), para facilitar sua aplicação.

Ambigüidade	Considerado não ambíguo aquele descritor em que cada um de seus níveis de impacto tem um significado claro e facilmente distinguível dos outros descritores
Mensurabilidade	É mensurável quando define o estado ou nível de impacto de um PVF de forma detalhada e precisa sem dar lugar a ambigüidade de interpretação. Os níveis de impacto tipo “bom”, “fraco”, “ruim”, diminuem a Mensurabilidade do descritor
Operacionalidade	O descritor é considerado operacional quando permite descrever os diferentes estados do indicador (I_i) e por sua vez fornece uma base para o julgamento do nível em questão por qualquer decisor
Compreensibilidade	Um descritor compreensível deve permitir descrever e interpretar o nível de impacto de forma não ambígua, quer dizer, o valor que uma pessoa associa a um determinado nível deve ser o mesmo que outra pessoa interpreta

Fig. 4.7- Bateria de exigências a serem cumpridas pelos níveis de impacto dos descritores.

Depois de aplicada a bateria de testes mostradas na figura 4.7, a cada descritor (tarefa esta do facilitador), serão realizadas as correções que se fizerem necessárias. Os níveis de impacto de cada descritor, assim determinados, formam a família ou árvore de níveis de impacto (PVEs) do indicador analisado e, assim, considerados níveis escalares dos indicadores de manutenibilidade que serão utilizados no modelo de avaliação;

4º passo: Verificar a existência de combinações entre descritores. Para esta verificação examina-se a possibilidade de existir combinações entre os níveis de impacto dos descritores do tipo indireto construído. Estas combinações, se existirem, geram uma família ou grupo de níveis ordinais, segundo as possíveis combinações entre os níveis originais do descritor, que devem ser procuradas, analisadas e ordenadas hierarquicamente de forma decrescente, utilizando o auxílio de uma matriz de ordenação como o da figura 3.20 (item 3.4.2.1);

5º passo: Construir a escala ordinal de descritores. Para criar a escala ordinal deve-se ordenar de forma hierárquica decrescente, a família de níveis de impacto (N_k) determinada pelos descritores. Esta ordenação, que poderá usar o auxílio da matriz de ordenação (Figura 3.20),

dará como resultando uma escala ordinal quantitativa, do tipo direto (naturais ou construídos) ou indireto (naturais ou construídos), com (k) níveis de impacto. Estas escalas assim obtidas estabelecem os níveis (N_k) de juízo de valor de descritores desenvolvidos para os indicadores de manutenibilidade, que darão lugar às escalas de valor, a serem determinadas no próximo item.

Obedecendo-se à sequência dos cinco passos apresentados, executa-se a construção dos descritores, para os indicadores (I_i) escolhidos na figura 4.3.

- Descritores do Indicador: **“Tipo de Fixação/ União”**.

1º passo: Definição do indicador.

Este indicador refere-se ao tipo de união e fixação dos componentes de um sistema, quanto ao modo ou forma de soltura ou fixação e/ou união de seus componentes, com finalização rápida da tarefa durante a desmontagem ou montagem dos elementos (definição extraída do item 2.2 onde todos os indicadores foram definidos). Esta característica diz respeito a como facilitar a atividade que geralmente consome a maior percentagem do tempo total da atividade de manutenção, ou seja, desmontagem e montagem (ver Anexo C);

2º passo: Escolha do descritor do indicador e seus níveis de impacto.

Com a ajuda do grupo de decisores procura-se o descritor e seus níveis de impacto neste indicador, resultando o descritor do tipo indireto construído apresentado na figura 4.8.

Descritor para: Tipo de Fixação/ União	Nível Escalar
Fixação com elemento passante; de aplique elástico; de um giro; trava ou similar.	N5
Fixação com um parafuso, luva de união ou elemento de varias voltas.	N4
Fixação com até 3 parafusos ou elemento similar	N3
Fixação com até 6 parafusos ou elemento similar	N2
Fixação com mais de 6 parafusos ou elemento similar	N1

Fig. 4.8- Descritor do Indicador “Tipo de Fixação/ União”

3º passo: Aplicação da bateria de exigências a serem cumpridas pelo descritor.

A aplicação desta bateria de testes (Figura 4.4) é direta e auto-explicativa, assim passa-se a referir unicamente o resultado de sua aplicação, ou seja, se o descritor é aprovado ou reprovado, sendo que para este último caso deverá ser apresentada uma justificativa. O resultado desta aplicação resulta na aprovação do descritor “Tipo de Fixação/ União”;

4º passo: Verificar a existência de combinações entre os níveis de impacto do descritor.

Esta combinação entre os níveis deste descritor, não acontece, ficando originalmente como descrito na figura 4.8.

5º passo: Construção da Escala Ordinal dos Descritores.

A ordenação hierárquica decrescente dos níveis do descritor (Figura 4.8), fornece a escala ordinal que é do tipo indireto construído. Esta escala determina os possíveis níveis de juízo de valor que o descritor permite na avaliação deste indicador de manutenibilidade. Para isto, falta estabelecer a quantificação de cada nível através da função de valor, que será determinada no próximo item. Como esta ordenação já foi procurada propositalmente no segundo passo, a escala ordinal é a mesma do quadro figura 4.8.

- Descritores do Indicador: “Características de Ajustagem e Calibragem”

Aplicando-se os cinco passos de desenvolvimento (figura 4.6), obtém-se o descritor da figura 4.9. Lembrar que a definição dos indicadores aqui utilizada encontra-se no item 2.2.

Descritor para: Ajustagem e Calibragem	Nível Escalar
Não precisam de ajustagem e calibragem ou auto-ajustavel.	N5
Ajustagem com um tensor de rosca ou elemento, sem calibragem/ gabarito.	N4
Ajustagem com um tensor de rosca ou elemento, com calibragem/ gabarito.	N3
Ajustagem com mais de um tensor de rosca ou elemento, sem calibragem/ gabarito.	N2
Ajustagem com mais de um tensor de rosca ou elemento, com calibragem/ gabarito.	N1

Fig. 4.9- Descritor do indicador “Características de ajustagem e calibragem”

- **Descritores do Indicador: “Simplicidade Estrutural e Funcional”**

De forma idêntica à anterior, obtém-se o descritor da figura 4.10. O nível de habilidade foi classificado em quatro categorias: pouca, média, normal e muita (adaptado de KELLY apud MATOS, 1999).

Descritor para: Simplicidade Estrutural e Funcional	Nível Escalar
Mecanismos convencionais de especialidade única sem dependência estrutural/ funcional, pouca habilidade da mão-de-obra.	N5
Componentes com dependência estrutural e funcional e preponderância numa única especialidade, mão-de-obra com habilidade média.	N4
Grande número de componentes com dependência estrutural e funcional, preponderância numa única especialidade que exige habilidade normal e capacitação de mão-de-obra.	N3
Mecanismos com dependência estrutural e funcional e varias especialidades, exige grande quantidade de informação, concentração, memorização, muita habilidade e capacitação.	N2
Mecanismos com dependência estrutural e funcional e varias especialidades, exige grande quantidade de informação, concentração, memorização, muita habilidade e capacitação. Uso de tecnologia inovadora, muitos recursos envolvidos e alta probabilidade de erros.	N1

Fig. 4.10- Descritor do indicador “Simplicidade Estrutural e Funcional”

- **Descritores do Indicador: “Acessibilidade e visibilidade”**

De forma idêntica ao anterior, obtém-se este descritor, porém, por possuir combinações entre seus níveis de impacto, mostra-se o desenvolvimento do quarto passo na obtenção do descritor final.

Lembrando o item 3.4.2.1, este descritor avalia duas situações, acessibilidade e visibilidade, cuja definição do item 2.2 é:

- **Acessibilidade:** avalia a facilidade ou esforço de se chegar até o componente ou sistema (com ferramentas comuns), para exercer atividades de manutenção.
- **Visibilidade:** avalia a facilidade ou esforço de se visualizar o componente ou sistema (sem auxílio ou recursos de aparelhos óticos), para exercer atividades de manutenção.

Para construir as combinações possíveis deste descritor deve-se especificar os diferentes estados de cada PVE, neste caso, “Acessibilidade e Visibilidade”, que representados graficamente na figura 4.11, tem-se:

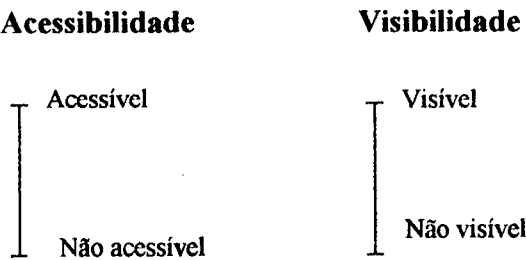


Fig. 4.11: Possíveis estados do descritor “Acessibilidade e Visibilidade”.

A figura 4.12 mostra as possíveis combinações entre os diferentes estados do descritor “Acessibilidade e Visibilidade”, dando como resultado os níveis de avaliação do descritor, incluindo-se uma representação simbólica para melhor interpretação.

NÍVEL	DESCRIPTOR	SÍMBOLO
N1	Possui acessibilidade e visibilidade total	
N2	Possui acessibilidade total, sem visibilidade	
N3	Não possui acessibilidade, mas tem visibilidade total	
N4	Não possui acessibilidade e visibilidade	

Fig. 4.12- Combinações dos níveis do descritor construído para avaliar o indicador “Acessibilidade e Visibilidade”

Os níveis do descritor da figura 4.12 estão ordenados, hierarquicamente, de forma decrescente, em função da atratividade apresentada por cada nível, segundo juízos de valor dos decisores. Neste caso, esta ordenação foi facilitada pela simples observação dos seus níveis, sem auxílio de ferramentas.

Com esta construção tem-se o descritor da figura 4.13-a.

Descritor para: Acessibilidade e Visibilidade	Nível Escalar
Totalmente Acessível e Visível	N4
Totalmente Acessível porém não Visível	N3
Totalmente Visível porém não Acessível	N2
Sem nenhuma Acessibilidade e Visibilidade, exige desmontagem prévia.	N1

Fig. 4.13-a: Descritor do indicador “Acessibilidade e Visibilidade” obtida pelas combinações da figura 4.12

Entretanto, segundo análise dos decisores e facilitador, optou-se por adicionar mais um nível na escala do descritor, ficando segundo a figura 4.13-b.

Descritor para: Acessibilidade e Visibilidade	Nível Escalar
Totalmente Acessível e visível	N5
Totalmente Acessível porém não visível	N4
Totalmente visível porém não Acessível	N3
Acessibilidade e visibilidade comprometida exige esforço para posicionamento físico do trabalhador.	N2
Sem nenhuma acessibilidade e visibilidade, exige desmontagem prévia.	N1

Fig. 4.13-b: Descritor do indicador “Acessibilidade e Visibilidade”

- **Descritores do Indicador: “Alcançabilidade e Manejabilidade”**

Este descritor, também, possui combinações entre seus diferentes estados, por isso aplica-se o mesmo procedimento do descritor anterior que, por ser idêntico, não se repete, no

qual também foi decidido adicionar mais um nível escalar além do obtido no processo normal, obtendo-se a escala ordinal da figura 4.14.

Descritor para: “Alcançabilidade e Manejabilidade”	Nível Escalar
Totalmente Alcançável e Manejável	N5
Totalmente Alcançável porém não Manejável	N4
Totalmente manejável porém não Alcançável	N3
Alcançabilidade e Manejabilidade comprometida exigem esforço físico do trabalhador.	N2
Sem nenhuma Alcançabilidade e Manejabilidade, exige desmontagem prévia.	N1

Fig. 4.14- Descritor do indicador “Alcançabilidade e Manejabilidade”

Construídos os descritores de cada indicador de mantabilidade, continua-se com a fase 4, que trata da construção das funções de valor.

4.2.4- Fase 4: Construção das Funções de Valor dos Indicadores

Para obter as funções de valor, correspondentes a cada indicador, será aplicada a técnica de análise de juízo de valor de *Macbeth* (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based evaluation Technique*) (ENSSLIN, 1998; BANA E COSTA et al., 1995), segundo descrito no item 3.4.3.

O preenchimento das matrizes exigidas pelo método foi realizado, segundo juízos de valor dos decisores, tendo-se em conta a escala de *Macbeth* (Figura 3.8), e a escala de avaliação das possíveis condições adquiridas pelas características de mantabilidade, segundo norma MIL-HDBK-475. No Anexo K, mostram-se as matrizes preenchidas e resultados obtidos para cada escala de valor através do software especializado (BANA E COSTA et al., 1997).

Desta aplicação, obtiveram-se as funções de valor que serão utilizadas pelo modelo como instrumentos de avaliação da manutenibilidade $V_{(I_i)}$, de cada indicador (I_i), apresentados nas figuras 4.15; 4.17; 4.18; 4.19 e 4.20.

A figura 4.15 mostra a escala de valor do indicador "Tipo de Fixação/ União"

Nível Escalar	Indicador: "Tipo de Fixação/ União"	Valor (V)
N5	Fixação com elementos passantes, de aplique elástico ou de um giro, trava ou excêntrico.	100
N4	Fixação com um parafuso, luva de união ou elemento de várias voltas.	83,3
N3	Fixação com ate 3 parafusos ou elemento similar	58,3
N2	Fixação com ate 6 parafusos ou elemento similar	33,3
N1	Fixação com mais de 6 parafusos ou elemento similar	0

Fig. 4.15- Escala de valor de manutenabilidade (V) do indicador "Tipo de Fixação/ União"

A figura 4.16 mostra o gráfico da função de valor do indicador "Tipo de Fixação/ União".

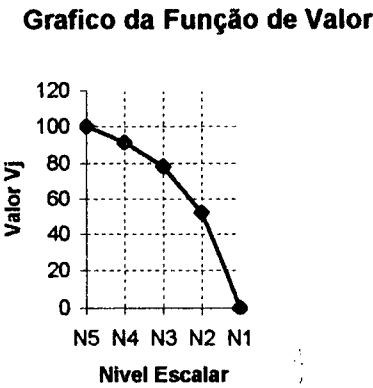


Fig. 4.16- Gráfico da Função de valor do Indicador "Tipo de Fixação/ União"

A figura 4.17 mostra a escala de valor do indicador "Simplicidade Estrutural/ Funcional".

Nível Escalar	Indicador: “Simplicidade Estrutural/ Funcional”	Valor (V)
N5	Mecanismos convencionais de especialidade única sem dependência estrutural/ funcional, pouca habilidade de mão-de-obra.	100
N4	Componentes com dependência estrutural e funcional e preponderância numa única especialidade, mão-de-obra com habilidade média.	91,7
N3	Grande número de componentes com dependência estrutural e funcional, preponderância numa única especialidade que exige habilidade normal e capacitação de mão-de-obra.	75
N2	Mecanismos com dependência estrutural e funcional e várias especialidades, exige grande quantidade de informação, concentração, muita habilidade e capacitação.	50
N1	Mecanismos com dependência estrutural e funcional de várias especialidades, exige grande quantidade de informação, concentração, memorização, muita habilidade e capacitação. Uso de tecnologia inovadora, muitos recursos envolvidos e alta probabilidade de erro.	0

Fig. 4.17- Escala de valor de manutenibilidade (V) do indicador “Simplicidade Estrutural/ Funcional”

A figura 4.18 mostra a escala de valor do indicador “Acessibilidade e Visibilidade”.

Nível Escalar	Indicador: “Acessibilidade e Visibilidade”	Valor (V)
N5	Totalmente Acessível e Visível	100
N4	Totalmente Acessível porém não Visível	90,9
N3	Totalmente Visível porém não Acessível	81,8
N2	Acessibilidade e Visibilidade comprometida, exige esforço para posicionamento físico do trabalhador	54,5
N1	Sem nenhuma Acessibilidade e Visibilidade, exige desmontagem prévia.	0

Fig. 4.18- Escala de valor de manutenibilidade (V) do indicador “Acessibilidade e Visibilidade”

A figura 4.19 mostra a escala de valor do indicador “Alcançabilidade e Manejabilidade”.

Nível Escalar	Indicador: “Alcançabilidade e Manejabilidade”	Valor (V)
N5	Totalmente Alcançável e Manejável	100
N4	Totalmente Alcançável porém não Manejável	88,9
N3	Totalmente Manejável porém não Alcançável	72,2
N2	Alcançabilidade e Manejabilidade comprometidas, exige esforço físico do trabalhador	38,9
N1	Sem nenhuma Alcançabilidade e Manejabilidade, exige desmontagem prévia	0

Fig. 4.19- Escala de valor de manutenabilidade (V) do indicador “Alcançabilidade e Manejabilidade”

A figura 4.20 mostra a escala de valor do indicador “Ajustagem e Calibragem”.

Nível Escalar	Indicador: “Ajustagem e Calibragem”	Valor (V)
N5	Não precisa de calibragem ou autoajustável.	100
N4	Ajuste com um tensor de rosca ou elemento e sem calibragem/ gabarito.	72,7
N3	Ajuste com um tensor de rosca ou elemento e com calibragem/ gabarito.	54,5
N2	Ajuste com mais de um tensor de rosca ou elemento e sem calibragem/ gabarito	27,3
N1	Ajuste com mais de um tensor de rosca ou elemento e com calibragem/ gabarito	0

Fig. 4.20- Escala de valor de manutenabilidade (V) do indicador “Ajustagem e Calibragem”

Tem-se assim obtidas as escalas de juízo de valor que serão utilizadas no modelo como instrumento de medição dos indicadores de manutenabilidade.

4.2.4.1- Transformação das Escalas de Valor em Escalas de Referências para os Níveis Bom e Neutro

Segundo item 3.4.3.2, esta transformação se faz necessária na operação do MCDA pelo menos, em dois casos: para obtenção das taxas de substituição, e para verificar a isolabilidade (Teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal), dos níveis de escala dos descritores.

Dada a utilização a que se destinam as escalas originais, obtidas para este modelo, é óbvio verificar que estas preferências encontram-se nos extremos das respectivas escalas. Assim, a transformação matemática das funções escalares não será necessária, valendo como escalas transformadas as mesmas escalas originais do modelo, com os níveis de referência Bom e Neutro nos extremos de suas escalas (100 e 0 respectivamente), isto porque a definição dada pelo MCDA, para esta escala particular (Bom e Neutro), estabelece que nível Bom é o valor de escala de maior preferência, e o nível Neutro o de menor preferência. Estas escalas de referência (Bom e Neutro) serão utilizadas no próximo item.

4.2.5- Fase 5: Teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal

Para aprovar a escolha dos indicadores de manutenibilidade e seus descritores, com suas correspondentes escalas de níveis de impacto escalar deve ser realizado o teste de Independência Preferencial Mútua Ordinal e Cardinal ou teste de isolabilidade.

Como foi visto no item 3.4.3.3, estes testes serão realizados pelo facilitador, através de comparações par a par com toda a família de indicadores (I_i), sendo verificado se a escolha de um determinado valor (V) da escala (N_k) de um dado (I_i), independe da escolha dos outros valores (V') dados aos outros indicadores (I_i), ou seja, a escolha de valores (V) para cada indicador, é independente entre si (isolabilidade). Esta verificação deve ser feita na escala ordinal e cardinal e serem independentes, em ambas escalas, para toda a família de indicadores do modelo.

Para facilitar a execução destes testes, desenvolvem-se aqui matrizes adaptadas segundo a abordagem dada no item 3.4.3.3, para verificar o cumprimento de independência ordinal e cardinal exigidas pelo método MCDA. Para isto, os testes de Independência Preferencial Ordinal Mútua e Independência Preferencial Cardinal Mútua, são realizados separadamente.

a) Teste de Independência Preferencial Ordinal Mútua

As matrizes das figuras 4.21 e 4.22 são utilizadas como ferramenta para facilitar a realização dos testes, em que se comparam ações de avaliação (a , a' e b , b') e (A , A' e B , B') entre indicadores (I_i), com valores (V) em níveis de impacto de referência específicos (Bom e Neutro), segundo a célula de referência indicada no quadro da matriz ao lado. As escalas de valor dos indicadores de manutenibilidade, transformadas em escalas de referência, para os níveis Bom e Neutro, são as mesmas escalas obtidas para o modelo (ver item 4.2.4.1).

Ação a :	I_i (NB) e I_{i+1} (NB)	a Preferível de b ($a P a'$)
Ação a' :	I_i (NB) e I_{i+1} (NN)	
Ação b :	I_i (NN) e I_{i+1} (NB)	b Preferível de b' ($b P b'$)
Ação b' :	I_i (NN) e I_{i+1} (NN)	

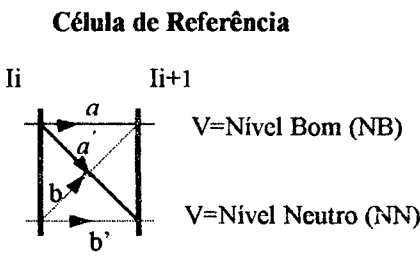


Fig. 4.21- Matriz de teste de Independência Preferencial Ordinal Mútua dos indicadores (I_i) em ordem crescente de $i = 1$ até $i=n$.

Para satisfazer a Independência Preferencial Ordinal entre fatores, deve acontecer a forma de preferência das ações mostrada na figura 4.21. Para isso, a matriz vai sendo carregada com todos os (I_i), sequencialmente de par em par, na ordem crescente de ($i = 1$ até n), formando combinações de n fatores (I_i), tomados de dois em dois [$C(I_i, 2)$].

Se da aplicação desta matriz resultar que $a P a'$ (significa a preferível de a'), então $b P b'$, em todos os níveis de impacto de I_i e I_{i+1} (desde $i=1$ até $i=n-1$), verificando-se com isto que os indicadores (I_i) têm Independência Preferencial Ordinal em todos seus níveis na relação de $i=1$ até $i=n$.

Como esta independência deve ser mútuo o teste deve, também, ser executado na relação inversa, ou seja, comparar (I_{i+1}) com (I_i) ou de forma geral (I_n) com (I_{n-1}), formando combinações de n fatores (I_i), tomados de dois em dois (de n até 1), na ordem decrescente. Para isso, a segunda matriz de teste a ser utilizada é mostrada na figura 4.22.

Ação A:	In (NB) e In-1 (NB)	A Preferível de A' (A P A')
Ação A':	In (NB) e In-1 (NN)	
Ação B:	In (NN) e In-1 (NB)	B Preferível de B' (B P B')
Ação B':	In (NN) e In-1 (NN)	

Célula de Referência

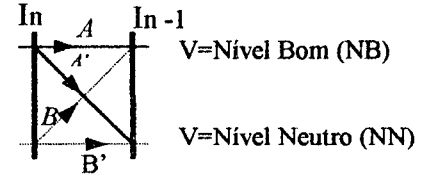


Fig. 4.22- Matriz de teste de Independência Preferencial Ordinal Mútua dos indicadores (Ii), na ordem decrescente de $i=n$ até $i=1$.

De forma idêntica à primeira matriz, para satisfazer a Independência Preferencial Ordinal Mútua, entre os fatores (In), deve acontecer a mesma forma de preferência nas ações da matriz. E se nesse processo de verificação com a segunda matriz, também ocorrer que $A P B$ (significa A preferível de B) para, então, $A' P B'$, em todos os níveis de impacto de In e $In-1$ (na forma decrescente de n para 1), verifica-se com isto que os indicadores (In) têm Mútua Independência Preferencial Ordinal em todos seus níveis, na relação inversa de $i = n$ até $i = 1$. E quando assim ocorrer como resultado da aplicação das duas matrizes, em toda a família de indicadores (Ii) do modelo, testados nas duas direções, verifica-se que são Mutuamente Preferencialmente Independentes na Escala Ordinal.

b) Teste de Independência Preferencial Cardinal Mútua

A matriz da figura 4.23 executa o teste de Independência Preferencial Cardinal Mútua entre os descritores de um mesmo indicador (Ii). Nesta, verifica-se que a diferença de atratividade $\Delta V_{(Ii)}$, apresentada entre os níveis de impacto “Bom e Neutro” (da escala de valores transformada para estes níveis de referência, ver item 4.2.4.1), seja a mesma independentemente do nível de impacto (N_k) no valor (V) dos outros indicadores pertencentes à mesma família desmontagem/ montagem. Com isso, a matriz verifica que a ação “a” seja independente da ação “b” e da ação “c”. Assim, o teste é realizado preenchendo-se a matriz da figura 4.23, sequencialmente com toda a família de (Ii), na ordem crescente de $i = 1$ até $i=n$ e de forma inversa ou decrescente ($i = n$ até $i=1$).

Ação a:	$\Delta [I_i (NB) - I_i (NN)]$	a Preferível de b (a P b)
Ação b:	$I_{i+1}(NB)$	
Ação a:	$\Delta [I_i (NB) - I_i (NN)]$	a Preferível de c (a P c)
Ação c:	$I_{i+1}(NN)$	

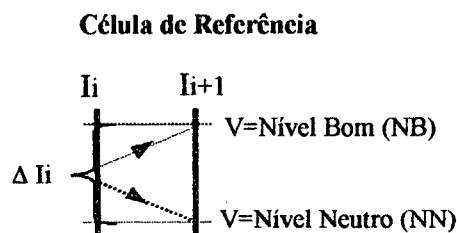


Fig. 4.23- Matriz de teste de independência preferencial cardinal mútua dos fatores (I_i).

O Anexo L mostra as matrizes preenchidas, de forma geral, com todas as combinações de I_i (de $i=1$ até $i=n$) e vice-versa de I_n (de $i=n$ até $i=1$), segundo testes realizados com as matrizes 4.21; 4.22 e 4.23, que verificam o cumprimento das quatro hipóteses estabelecidas pelo método MCDA, ou seja, Independência Preferencial Mútua Ordinal e Independência Preferencial Mútua Cardinal, condição que foi cumprida por toda a família de indicadores I_i e, assim, aceitos como indicadores das características de manutenibilidade do modelo.

4.2.6- Fase 6: Obtenção das Taxas de Substituição ou Pesos de Ponderação dos Indicadores de Manutenibilidade

Como foi visto no item 3.4.4, peso ou taxa de substituição de um indicador é um fator de escalarização que modula ou equaliza a contribuição de cada indicador (segundo sua importância relativa) sobre o valor global de manutenibilidade. Assim, estas taxas ou pesos transformam valores locais em valores globais.

O método utilizado para a obtenção destas taxas, (visto no item 3.4.4), utiliza o MCDA, semelhante ao utilizado para determinar as funções de valor dos indicadores de manutenibilidade. Estes procedimentos devem ser aplicados à família de indicadores escolhidos para o modelo, e consta de três passos:

- 1º. Passo: Ordenar preferencialmente os indicadores de forma decrescente, em função do mais atrativo para o menos atrativo, utilizando a matriz de ordenação da figura 3.20. Como foi mencionada, esta matriz, também, pode cumprir a função de filtro, selecionando os verdadeiros fatores, segundo os decisores, auxiliando a análise de escolha e expondo de forma mais detalhada a contribuição de cada fator para a missão desejada;

- 2º. Passo: Depois de se obter a ordenação hierárquica preferencial dos indicadores, aplica-se a matriz de *Macbeth* (preenchida no Quadro K.6, Anexo K). A análise para o preenchimento desta matriz é realizada, utilizando-se como referências os valores (V) dos indicadores de manutenibilidade nos níveis de Bom= 100 e Neutro= 0 (ver item 4.2.4.1), e resolvida, através do *software*, para solução da matriz de *Macbeth*, para obterem-se os valores (W_i), que representam a escala de preferência dos indicadores (I_i) segundo *Macbeth*, da qual serão calculadas as taxas de substituição de cada indicador.
- 3º. Passo: Da escala de valor obtida no item anterior, aplica-se a expressão (4.1) (ver item 3.4.4), para se obterem as taxas de substituição dos indicadores do modelo, pertencentes à família “Facilidade de Desmontagem/ Montagem” (figura 4.5).

$$P_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \times 100$$

(4.1)

A figura 4.24 mostra uma síntese dos três passos explicados acima para se obter as taxas de substituição.

Seqüência	Procedimento
1º. Passo	Preencher a matriz da tabela 3.6 para ordenação hierárquica decrescente (do mais atrativo para o menos atrativo) dos indicadores de manutenibilidade
2º. Passo	Resolver a matriz de juízo de valor aplicando-se o método <i>Macbeth</i> como explicado no item 3.4.4.
3º. Passo	Aplicar a expressão (4.1) para obter a escala correspondente à taxa de substituição dos indicadores de manutenibilidade. $P_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \times 100$

Fig. 4.24- Síntese do procedimento a ser realizado para a obtenção das taxas de substituição.

A figura 4.25 mostra os indicadores ordenados hierarquicamente de forma preferencial e os valores (W_i) obtidos, segundo escala *Macbeth* com as taxas de substituição que serão utilizadas pelo modelo na operação de agregação aditiva dos valores V_(ij), para obtenção do valor parcial de manutenibilidade (S_{Im}).

Peso (Pi)	Indicador de Manutenibilidade (I _i)	Escala Macbeth (W _i)	Valor do Peso (Taxa de Substituição)
P1	I ₁ : Tipo de Fixação/ União	W ₁ =100,00	31,48
P2	I ₂ : Simplicidade Estrutural/ Funcional	W ₂ =82,35	25,93
P3	I ₃ : Acessibilidade e Visibilidade	W ₃ =64,71	20,37
P4	I ₄ : Alcançabilidade e Manejabilidade	W ₄ =47,06	14,81
P5	I ₅ : Ajustagem e Calibragem	W ₅ =23,06	7,41
		Σ W _i = 317,18	Σ P _i = 100

Fig. 4.25- Pesos de ponderação (Pi) dos Indicadores de Manutenibilidade (I_i)

Obtidos os indicadores com suas funções escalares e taxas de substituição, resta realizar o teste de sensibilidade das mesmas, tema do próximo item.

4.2.7- Fase 7: Análise da Sensibilidade do Modelo

Como se comentou no item 3.4.5, esta análise é realizada para examinar se o modelo é robusto às alterações dos parâmetros de avaliação do modelo. Isto significa detectar a grandeza de variação do valor global de manutenibilidade (calculado pela agregação aditiva do espectro de indicadores depois de afetados por seus correspondentes pesos), quando se modifica o valor da taxa de substituição de um dos indicadores.

Assim, trata-se nesta etapa de detectar o ajuste necessário nas escalas de valor obtidas para o modelo (indicadores e taxas de substituição), para que a avaliação dos indicadores se comporte de forma robusta, ou seja, pouco sensível a variações no valor global de manutenibilidade, quando se modifica o valor em qualquer indicador ou peso, numa dada proporção. Esta análise é compulsória, já que permite obter o grau de confiança dos resultados obtidos pelo modelo construído.

Como o parâmetro, que mais justifica esta análise é a taxa de substituição, sua verificação torna-se obrigatória. Para este procedimento, neste trabalho, aplica-se o método gráfico especializado para análise de sensibilidade, através do *software HIVIEW* (BARCLAY, 1984), do qual obter-se-ão as informações para a execução do relatório. Estas informações

serão adicionadas às performances de funcionamento do modelo, explicitando o grau de flexibilidade dos valores fornecidos, permitindo referenciar futuras correções de adequação de escalas, para casos específicos de aplicação do modelo.

Neste modelo, a análise de sensibilidade verifica que as variações provocadas, em torno das atuais taxas de substituição ($\pm 10\%$) (ENSSLIN, 1998) provoquem o mínimo de variação no valor global calculado e, mais importante ainda, que não iguale ou inverta a posição de grandeza (maior/ menor) deste valor global entre diferentes alternativas de avaliação de um sistema. Caso estas condições não se verifiquem, as escalas utilizadas indicarão instabilidade, por não manterem e/ou mudarem o significado de interpretação de avaliação, segundo seja o valor da taxa de substituição.

O anexo M apresenta os gráficos elaborados pelo *software HIVIEW*. Estes gráficos são construídos a partir do conjunto de valores (V), obtidos da avaliação do espectro de indicadores (Ii) do modelo, que depois de afetados pela taxa de substituição ou peso (P) representam o valor total de manutenibilidade (SI_m) nas atividades de desmontagem/ montagem para manutenção. Por necessitar referenciar os indicadores (Ii) com valores específicos de avaliação (V), consideram-se os resultados obtidos na avaliação do produto de teste utilizado neste trabalho, segundo valores da figura 5.6 do Capítulo 5.

Lembrando o item 3.4.5, os gráficos mostram na abscissa a variação de 0 a 100 do peso (P) do indicador (Ii) que está sendo analisado, e na ordenada, a variação de 0 a 100 do valor total de manutenibilidade (ver item 3.4.4). As retas representam a função do valor total de manutenibilidade para cada alternativa ou situação avaliada (no caso do exemplo utilizado os valores da figura 5.6 para os blocos e sub-bloco de atividade de manutenção da figura 5.3).

Da análise destes gráficos, elaboraram-se as seguintes conclusões:

- O gráfico I₁ representa o comportamento do indicador “Tipo de Fixação/União”, mostrando-se mais robusto à direita de seu atual valor de taxa de substituição (31,48), apresentando forte instabilidade à esquerda deste valor (de 0 a 16), em que os valores globais de manutenibilidade dos sub-blocos 1, 4 e 5 tendem a igualar-se e/ou inverter sua posição de grandeza no ponto crítico P=16. Observa-se também que as retas que representam os sub-blocos 1 e 4 se confundem em toda a extensão de variação do peso por possuírem valores de avaliação idênticos. O sub-bloco 3 apresenta maior estabilidade possuindo um ponto crítico em P=100 em que se iguala com o sub-bloco 5. O sub-bloco 2

apresenta boa estabilidade não possuindo pontos críticos (inversão no valor de grandeza). Entretanto no entorno ($\pm 10\%$) do valor do peso atual ($P=31,48$), os valores totais de manutenibilidade nos cinco sub-blocos mudam em proporção inferior à variação ensaiada na taxa de substituição, mostrando que o indicador analisado possui uma estabilidade aceitável.

- O gráfico I_2 mostra o comportamento do indicador “Simplicidade Estrutural/ Funcional”, onde os sub-blocos 1, 3, 4 e 5 apresentam-se muito robustos em toda a faixa de valor do peso (0 a 100), O sub-bloco 2 apresenta maior tendência de variação (menos estável), porém não prejudica sua robustez. Todas as retas apresentam um ponto crítico comum no final da escala ($P=100$), que não compromete sua estabilidade, já que os pontos críticos extremos (0 e 100) não influenciam a estabilidade desde que as pendentes das retas que representam ações ou blocos de atividades sejam suaves.
- Os gráficos I_3 e I_4 analisam a sensibilidade dos indicadores “Acessibilidade/ Visibilidade” e “Alcançabilidade/ Manejabilidade”, que mostram uma estabilidade idêntica ao gráfico anterior.
- O gráfico I_5 representa a sensibilidade do indicador “Ajustagem e Calibragem”, que mostra uma robustez inferior dos outros indicadores, mostrando três pontos críticos. Um com valor de taxa de substituição próximo de $P=15$ (100% do valor atual $P=7,41$), neste ponto os valores globais de manutenibilidade dos sub-blocos 1, 4 e 5 se igualam, invertendo sua ordem de grandeza, quando o valor do peso do indicador I_5 passa à direita ou à esquerda deste valor. O segundo ponto crítico correspondente ao sub-bloco 3 e 5 acontece no valor $P=0$. O terceiro ponto crítico ocorre para os sub-blocos 1, 4 e 3 no valor de $P=100$. O sub-bloco 2 apresenta a menor robustez (maior tendência de variação ou instabilidade com a mudança da taxa de substituição). Entretanto no entorno ($\pm 10\%$) do valor do peso atual ($P=7,41$), o indicador analisado pode ser considerado estável.

O resultado da análise de sensibilidade obtido mostra que as escalas de valor a serem utilizadas, pelo modelo, satisfazem as pretensões de robustez deste trabalho, para avaliação das características de manutenibilidade nas atividades de desmontagem/ montagem em manutenção de produtos/ sistemas mecânicos.

Apresentou-se, com isso, o desenvolvimento da primeira parte indicada na figura 4.2, que proporcionou a obtenção das escalas de valor e taxas de substituição dos indicadores de manutenibilidade a serem utilizadas pelo modelo, juntamente com sua análise de sensibilidade. O próximo item continua com a segunda e última parte do desenvolvimento do modelo, que trata do procedimento para cálculo do índice de manutenibilidade propriamente dito.

4.3- Parte 2: Desenvolvimento do Modelo de cálculo para obtenção do Índice de Manutenibilidade

À continuação dar-se-á prosseguimento à descrição do desenvolvimento da metodologia para cálculo do índice de manutenibilidade de produtos/ sistemas mecânicos. Lembra-se que o modelo de avaliação destes indicadores está direcionado a características de manutenibilidades ligadas a atividades de desmontagem/ montagem para manutenção.

Pela figura 4.2, este desenvolvimento consta de três fases:

Fase 1: Desenvolvimento da Metodologia e Expressões para Obtenção do Índice de Manutenibilidade;

Fase 2: Descrição da Metodologia para Aplicação do Modelo na Avaliação de características de Manutenibilidade;

Fase 3: Método para Rastreamento das Características de Manutenibilidade Fortes e Fracas

O próximo item descreve a fase 1, que fornece a metodologia e expressão para obtenção dos índices de manutenibilidade.

4.3.1- Fase 1: Desenvolvimento da Metodologia e Expressões para Obtenção do Índice de Manutenibilidade

Para melhor interpretar este desenvolvimento, primeiramente, deve ser definido o caminho de análise a ser seguido pelo modelo para avaliar os indicadores de manutenibilidade e obterem-se seus índices. Esta forma de análise consiste em:

- 1- Verificar os componentes e atividades de manutenção no produto/ sistema que exigem desmontagem/ montagem (exemplo: trocar rolamento, trocar correia, etc.). Estes componentes e atividades podem ser selecionados através da análise de projeto do produto ou produto existente, com auxílio de ferramentas como árvore de falhas (ver Anexo E);

- 2- Avaliar o valor de manutenibilidade (V), através das funções de valor dos indicadores (I_i), necessários a cada atividade de manutenção encontrada acima;
- 3- Agregar os valores de manutenibilidade (V) dos indicadores de cada atividade em um valor parcial chamado de subíndice de manutenibilidade (SIM), obtida através da expressão (4.2) (ver item 3.4.4, expressão 3.1).

$$SIM = (V_{(I_1)} \cdot p_1 + V_{(I_2)} \cdot p_2 + V_{(I_3)} \cdot p_3 + \dots + V_{(I_n)} \cdot p_n) / 100 = \sum_i^n V_{(I_i)} \cdot p_i / 100 \quad (4.2)$$

Onde: $V_{(I_i)}$ é o valor de manutenibilidade do indicador I_i ;

p_i é o valor do peso ou taxa de substituição do indicador I_i .

Este procedimento conduzirá à obtenção de um valor parcial de manutenibilidade ou subíndice (SIM_j) para cada bloco (j) de atividade de desmontagem/ montagem exigida pela manutenção do item (componente/ conjunto).

- 4- Determinar um índice de manutenibilidade local (Im), para cada componente/ subconjunto/ conjunto do sistema, a partir dos (SIM_j), obtidos para cada bloco de atividade de desmontagem/ montagem do item avaliado. Assim, existirão (u) índices de manutenibilidade local (Im_u) para cada componente/ conjunto do sistema avaliado que exijam intervenções de manutenção com desmontagem/ montagem. Este índice local seria o valor médio dos subíndices obtidos em cada atividade de desmontagem/ montagem e calculado através de:

$$Im = \sum_j^n SIM_j / n_a \quad (4.3)$$

Onde: n_a é o número de atividades de desmontagem/ montagem executada no item avaliado;

j é o subíndice que identifica a atividade de desmontagem/ montagem executada.

Este processo proporcionará um índice de manutenibilidade (Im_u), para cada item/ componente/ conjunto (u) em atividade de manutenção.

- 5- Obter o índice de manutenibilidade global (Img) do produto/sistema, através da correlação dos índices de manutenibilidade local (Im_u) de cada item/ componente/ conjunto do sistema avaliado.

A solução para resolver o problema do item 5 pode ser encontrada por mais de uma forma, entretanto, para este trabalho escolheu-se a expressão que considera, também, a frequência ou número de intervenções de manutenção de cada componente (com atividades de desmontagem/ montagem), durante a vida útil física, variável essencial na manutenção para formação dos MRT, disponibilidade e custos do ciclo de vida, entre outros. Esta forma de cálculo permite justificar produtos/ sistemas com baixa frequência de manutenção ($F \approx 1$) e/ou descartáveis, o que permite, neste caso, aceitar baixos valores de manutenibilidade. Do lado oposto, os componentes com frequências de manutenção elevadas, exigem altos valores de manutenibilidade, para compensar o tempo por paradas frequentes de manutenção planejada.

Assim, para este modelo, a forma de cálculo do (Img) dar-se-á, também, pela ponderação da frequência de intervenções (F) a que estes componentes/ conjuntos, estão submetidos, para manutenção com atividades de desmontagem/ montagem, durante a vida útil física estimada para o produto. Este valor de frequência $F > 0$ é calculado pela relação:

$$F = V_{ufp} / V_{ufc} \quad (4.4)$$

Onde: V_{ufp} é Vida útil física do produto;

V_{ufc} : Vida útil física do componente, onde $V_{ufc} \leq V_{ufp}$.

A expressão pretendida para calcular o índice de manutenibilidade global (Img), correlaciona os valores do índice local (Im_u), com a frequência (F) através de taxas de ponderação com variação de 0 a 1. Esta ponderação pode incidir de diferentes formas sobre o valor do índice calculado, por exemplo: função linear, logarítmica ou outras. No Anexo N, são apresentadas estas funções, com a descrição do comportamento matemático, e a partir destas, justifica-se a escolha da expressão utilizada pelo modelo.

Assim a forma de cálculo do índice de manutenibilidade desenvolvida neste trabalho está dada pela expressão (4.5), que correlaciona os índices de manutenibilidade local (Im_u) de cada item/ conjunto do sistema avaliado, ponderado (de 0 ate 1) com a frequência de manutenção (F) e o número N_c de componentes avaliados. Esta expressão esta representada por:

$$Img = \frac{\sum_u^n Im_u \times (\log_k(K+1 - F_u))}{N_c} \quad (4.5)$$

Onde: Im_u é o valor do índice de manutenibilidade local do componente/ subconjunto/ conjunto u ;

F_u é o valor da frequência de intervenções de manutenção no conjunto (u) avaliado;

K é a base do logaritmo, recomendando-se $K=100$ (ver anexo N);

N_c é o numero de componentes/ conjuntos a serem tratados em cada atividade de manutenção do sistema.

Da expressão (4.5) que fornece o Índice de Manutenibilidade Global (Img) do produto/ sistema avaliado, pode-se tecer os seguintes comentários:

- o valor do índice de manutenibilidade local (Im) de cada componente/ conjunto do sistema avaliado que representa o valor médio da manutenibilidade obtida para cada indicador (I_i) do produto/ sistema, é uma característica intrínseca do projeto que depende das características de manutenibilidade projetadas (indicadores);
- o valor do índice de manutenibilidade global (Img) de um produto/ sistema sujeito a atividades de manutenção, é ponderado de forma logarítmica pela frequência de intervenções de manutenção (F) de cada componente/ conjunto avaliado;
- quanto maior o valor da frequência de intervenção (F) de um item, maior deverá ser o valor (V) dos indicadores (I_i) projetados para esse item, valendo também a relação inversa, ou seja, quanto menor a frequência (F), menor poderão ser os valores de manutenibilidade projetados para o mesmo;
- o maior valor de manutenibilidade global do sistema (Img) se obtém quando todos seus componentes possuem frequências de intervenção unitária ($F=1$). Neste caso se os componentes são descartáveis e o fim de vida útil destes coincide com o final de vida do produto/ sistema (compatibilidade de vida útil física entre os mesmos), cabe a descartabilidade do produto desde que técnico e economicamente viável. Caso contrario existe a necessidade de manutenção para troca dos componentes com recuperação parcial ou total do sistema;
- a conquista de frequências de intervenção $F=1$ (descartabilidade), podem permitir indicadores com valores de manutenibilidade $V \approx 0$, desde que o produto seja descartável ou

que os tempos de parada, nas atividades de manutenção para troca dos componentes/conjuntos, não impliquem em prejuízos técnicos/ econômicos;

- os valores de manutenibilidade desejados através das características de manutenibilidades projetadas no produto, devem ser procurados balanceando-se as duas variáveis principais de avaliação (V e F), ou seja, procurando a melhor relação entre ambas, para o melhor valor econômico de manutenibilidade (custo-benefício);
- o valor de confiabilidade dos componentes do produto tem relação direta com a frequência efetiva de intervenções de manutenção (F) baseada unicamente em manutenção planejada, pois desta dependerá o percentual de manutenção imprevista, que extrapola a previsão feita para (F) em função da vida útil física dos componentes e do produto, já que as técnicas de manutenção modernas foram desenvolvidas, objetivando a erradicação das mesmas (apesar que este tipo de manutenção também possui necessidades de desmontagem e montagem).

As observações comentadas acima mostram profunda coerência com a definição de manutenibilidade segundo Blanchard e Lowery (apud MIRSHAWKA, 1993), que a definem como: “característica de projeto de equipamentos e instalações expressa em termos de facilidade e economia de manutenção, aumentando a disponibilidade de equipamento com segurança e precisão na execução das ações de manutenção”.

Isto mostra porque a manutenibilidade deve ser estudada não só como característica técnica intrínseca do projeto, mas também de forma extrínseca, pelo enfoque sistêmico das variáveis que influenciam a atividade de manutenção (projeto, processo, mão de obra, logística, etc.), com o objetivo final que é indiscutivelmente o custo operativo gerado pelo produto/ sistema (ver expressões 2.3 e 2.4), que equivale ao custo do ciclo de vida do produto. Em termos mais atuais seria o valor econômico da disponibilidade e manutenibilidade do produto/ sistema (ver figura 2.12).

Todavia, ao observar-se a figura 3.3, verifica-se que a manutenibilidade é influenciada, no mínimo, por três áreas ou famílias de indicadores de manutenibilidade (facilidade estrutural, facilidade de desmontagem/ montagem e facilidade na detecção e localização de falhas), entre outras (ver item 2.2.1). Assim, para a obtenção de um valor global de manutenibilidade que contemple todas as áreas, dever-se-á calcular primeiro o índice de manutenibilidade (Img) do produto para cada área (como foi mostrado neste item para o

cluster “facilidade de desmontagem/ montagem”), e depois se calcularem as taxas de substituição (pesos) de cada área específica para, assim, determinar o índice de manutenibilidade total (IMT), que engloba o espectro de indicadores de manutenibilidade de todas as áreas ou *cluster*.

Pelo que se pesquisou sobre manutenibilidade para este trabalho pode-se concluir que não interessa chegar a este nível de detalhamento do índice de manutenibilidade, pois a árvore de indicadores que mede as características de manutenibilidade poderia se estender para incluir todas as áreas que intervêm no sistema de manutenção (processo, produto, mão-de-obra, logística, etc.). Esta situação complicaria a obtenção e explicação do índice assim obtido. Por este motivo, assume-se que o índice de manutenibilidade global seja tratado por área específica, que neste trabalho é “Facilidade de desmontagem e montagem” para atividades de manutenção.

Para melhor interpretar as performances do modelo apresentado, dado que o método de cálculo exige algumas particularidades, descreve-se no próximo item, a seqüência e forma de aplicação, correspondente à fase 2 do passo 2, apresentado na figura 4.2.

4.3.2- Fase 2: Metodologia para Aplicação do Modelo na Avaliação de Características de Manutenibilidade

Definidos os parâmetros e expressões necessárias para avaliar a manutenibilidade, resta condicioná-los num processo simples para aplicação do modelo, mostrando o procedimento a ser seguido na avaliação dos indicadores e cálculo dos índices de manutenibilidade, em produtos/ sistemas mecânicos, para as atividades de desmontagem/ montagem em manutenção. Este processo, baseado na abordagem seguida pelo item 4.3.1, consta da seguinte seqüência:

- 1º. Determinar a árvore estrutural do produto para identificar os componentes que merecem manutenção. (Para auxílio desta tarefa, podem ser utilizados *softwares* especialistas como os relacionados no Anexo E);
- 2º. Desenvolver a árvore de manutenção (NBR 5462, 1994) com o fluxograma das seqüências de desmontagem/ montagem (representadas graficamente em blocos), para as atividades de manutenção de cada componente identificado na etapa 1. Para facilitar este desenvolvimento, cada um dos blocos deve representar a atividade desenvolvida na

desmontagem e montagem de um único item (componente, subconjunto ou conjunto), de forma separada;

- 3°. Aplicando as funções de valor determinadas para o modelo, avaliar todo o espectro de indicadores de manutenibilidade (Figura 4.5) em cada bloco de atividades de manutenção determinado na sequência anterior, obtendo-se disto os valores de manutenibilidade (V), correspondentes a cada indicador do bloco avaliado;
- 4°. Com os valores de manutenibilidade (V), obter o subíndice de manutenibilidade (SIm), correspondente a cada bloco e sub-bloco de desmontagem/ montagem do item avaliado, aplicando-se à expressão (4.2), utilizando-se para isto as taxas de substituição (p_i) de cada indicador de manutenibilidade I_i (Figura 4.25);

$$SIm = \sum_i^n V_{(Ii)} \cdot p_i / 100 \quad (4.2)$$

- 5°. Com os valores dos subíndices (SIm) obtidos no passo anterior, calcular o índice de manutenibilidade local (Im) correspondente a cada item (componente, subconjunto ou conjunto), que merece atividades de manutenção com desmontagem/ montagem, aplicando-se a expressão da média aritmética (4.3);

$$Im = \sum_j^n \frac{SIm_j}{n_a} \quad (4.3)$$

- 6°. Para cada componente identificado, calcular a frequência de intervenção de manutenção (F), aplicando a expressão (4.4):

$$F = Vuf_p / Vuf_c \quad (4.4)$$

- 7°. Com os valores do índice de manutenibilidade local (Im) e as frequências (F), obtidos anteriormente, calcular o índice de manutenibilidade global (Img) correspondente ao produto/ sistema avaliado, aplicando-se a expressão de ponderação (4.5).

$$Img = \sum_u^n \frac{Im_u \times (\log_k(K+1 - F_u))}{N_c} \quad (4.5)$$

A figura 4.26 mostra a síntese do procedimento descrito para aplicação do modelo.

Seqüência	Procedimento	Resultado
1	Determinar a árvore estrutural do produto	Identificação dos componentes que merecem manutenção
2	Calcular a frequência de intervenção de manutenção (F) em cada componente identificado na seqüência (1)	Obtenção das frequências de cada componente; $F = V_{ufp} / V_{ufc}$
3	Desenvolver a árvore de manutenção com a seqüência de desmontagem e montagem em cada componente identificado	Representação gráfica em blocos das atividades de manutenção para facilitar a avaliação
4	Aplicar as funções de valor correspondente aos indicadores de manutenibilidade (I_i), em todos os blocos do fluxograma.	Obtenção dos valores de manutenibilidade (V) de cada fator (I_i)
5	Calcular os subíndice de manutenibilidade (SIm) em cada bloco de atividades	Obtenção dos subíndices de manutenibilidade em cada bloco de atividade $SIm = \sum_i^n V_{(I_i)} \cdot p_i$
6	Calcular o índice de manutenibilidade local (Im) correspondente a cada componente, subconjunto ou conjunto.	Obtenção dos índices de manutenibilidade local em cada componente/ conjunto; $Im = \frac{\sum_j^n SIm_j}{N_a}$
7	Calcular o índice de manutenibilidade global (Img), do produto/ sistema.	Obtenção do índice de manutenibilidade global do produto/sistema avaliado $(Img) = \frac{\sum_u^n Im_u \times (\log_k (K+1 - F_u))}{N_c}$

Fig. 4.26- Síntese do procedimento para aplicação do modelo.

O item seguinte descreve a fase 3, última parte do desenvolvimento do modelo.

4.3.3- Fase 3: Método para Rastreamento das Características de Manutenibilidade Fortes e Fracas

Uma das aplicações mais importantes que pode ser dada a este modelo de avaliação, está na possibilidade de se rastrear as características de manutenibilidade fortes e fracas em produtos/ sistemas.

Este rastreamento levará a detectar quais indicadores de manutenibilidade merecem atenção para possíveis melhorias, que elevaram o índice de manutenibilidade, juntamente com as performances de desempenho do sistema nas atividades de manutenção, com as

conseqüentes vantagens de MRT, precisão na estimação de tempos de parada, custo do ciclo de vida, confiabilidade, entre outras.

Para este rastreamento se propõe um método simples que consiste em preencher a matriz da figura 4.27. Esta matriz permite visualizar o contexto geral de avaliação de cada item (atividade/ bloco de manutenção, conjunto/ subconjunto), com o resultado individual, local e global dos indicadores de manutenibilidade (V ; SIm ; Im e Img). Assim sendo, a detecção das características de projeto mais fraca para manutenibilidade é instantânea, quando se verifica qual indicador possui o menor valor de manutenibilidade. Este método poderia utilizar também a representação gráfica dos valores indicados pela matriz.

Indicador de Manutenibilidade (I_i)	Atividade de manutenção (Bloco i)		Atividade de manutenção (Bloco u)	
	Valor de Manutenibilidade Sub-Bloco 1	Valor de Manutenibilidade Sub-Bloco n	Valor de Manutenibilidade Sub-Bloco 1	Valor de Manutenibilidade Sub-Bloco n
Tipo de Fixação/ União	$V(I_1)_1$	$V(I_2)_n$	$V(I_2)_1$	$V(I_2)_n$
Simplicidade Estrutural/ F.	$V(I_2)_1$	$V(I_2)_n$	$V(I_2)_1$	$V(I_2)_n$
Acessibilidade e Visibilidade	$V(I_3)_1$	$V(I_3)_n$	$V(I_3)_1$	$V(I_3)_n$
Alcançabilidade e Manejabilidade	$V(I_4)_1$	$V(I_4)_n$	$V(I_4)_1$	$V(I_4)_n$
Ajustagem e Calibragem	$V(I_5)_1$	$V(I_5)_n$	$V(I_5)_1$	$V(I_5)_n$
Subíndice de Manutenibilidade (SIm)	SIm_1	SIm_n	SIm_1	SIm_n
Índice de Manutenibilidade Local (Im)	Im_1		Im_u	

Fig. 4.27- Matriz para Rastreamento das Características de Manutenibilidade Fortes e Fracas

A importância das técnicas de rastreamento (matricial, gráfica, entre outras) está na capacidade que o método possui para detectar variáveis específicas de interesse para análise e/ou monitoração de desempenho de sistemas, permitindo na maioria dos casos aplicação rápida e singela ou automatizada através de software.

A figura 4.28 apresenta a síntese do método com a sequência a ser seguida para realizar o rastreamento das características de manutenibilidade, mostrando as tarefas de análise realizada e o resultado de cada tarefa, obtidos do rastreamento com a matriz indicada.

Sequência	Tarefa	Resultado
1	Verificar o menor Im	Detecta a atividade de manutenção de pior desempenho
2	Verificar o menor SIm	Detecta o bloco de atividade de manutenção de pior desempenho
3	Verificar o menor V	Detecta a característica de manutenibilidade no componente/ subconjunto/ conjunto de pior desempenho, que merecerá redesenho

Fig. 4.28- Síntese do método para identificar as Características de Manutenibilidade Fortes e Fracas

Desenvolveu-se neste Capítulo o modelo de avaliação das características de manutenibilidade e a forma de representação através de índices. Mostrou-se o processo de aplicação do modelo na atividade de avaliação, incluindo uma ferramenta para ser utilizada no rastreamento de características fortes e fracas, através dos resultados obtidos com o próprio modelo. Resta agora realizar a aplicação prática do modelo a um produto de teste, e verificar o comportamento através dos resultados fornecidos, tema este do próximo Capítulo.

CAPÍTULO 5- APLICAÇÃO DO MODELO PARA AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE MANTENABILIDADE E TESTES DE VERIFICAÇÃO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO

Neste capítulo, mostrar-se-á a aplicação prática do modelo desenvolvido para avaliação das características de Manutenibilidade, em produtos/ sistemas mecânicos, para atividades de desmontagem/ montagem na manutenção, e os testes a serem executados no produto avaliado, para verificar a funcionalidade e desempenho do modelo.

Para isso o Capítulo divide-se em quatro partes, como mostra a figura 5.1.

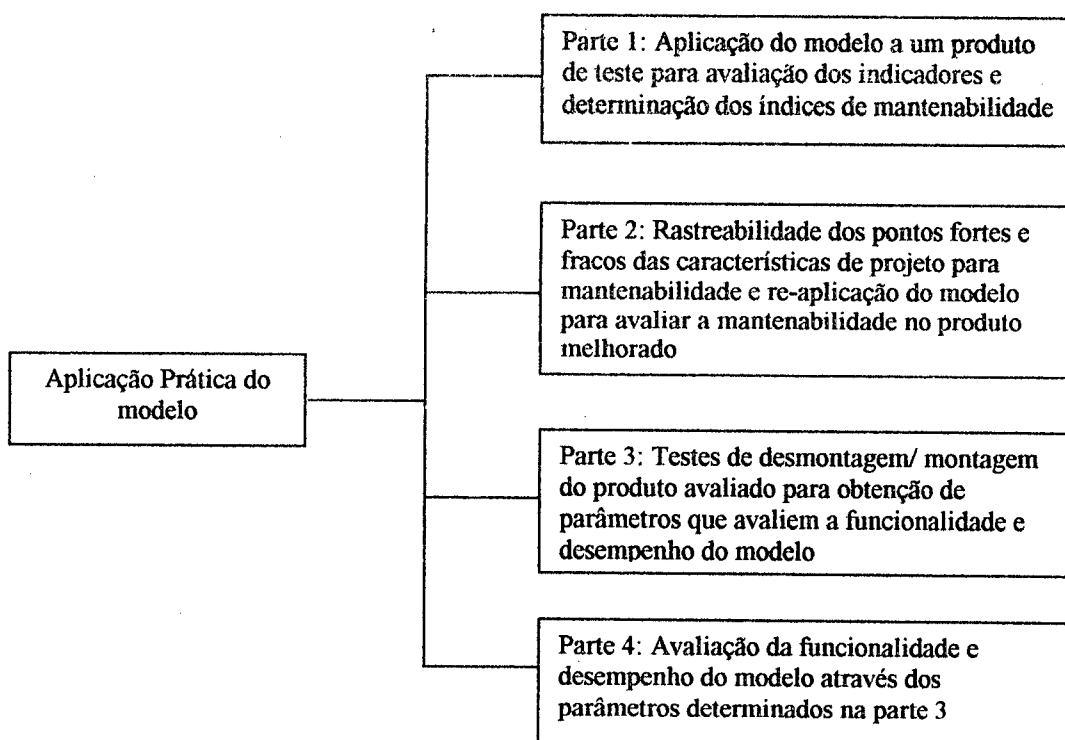


Fig. 5.1- Sequência a ser adotada para aplicação prática do modelo

Na continuação é descrita a sequência mostrada na figura 5.1.

Parte 1: A primeira parte consta da aplicação do modelo a um produto escolhido como teste, para avaliação dos indicadores e obtenção dos índices de manutenibilidade. Como produto de teste será escolhido um sistema mecânico, que permita explorar o modelo desenvolvido na avaliação dos indicadores de manutenibilidade em toda sua capacidade, como também, que esteja disponível para a pesquisa, permitindo modificações estruturais de projeto com baixo custo e tempo compatível com a duração da pesquisa. Estas condições foram satisfeitas num ventilador radial de pás retas com potência de 25 HP e vida útil física de 5 anos. Para avaliar os indicadores e obter os índices de manutenibilidade, o modelo será aplicado nas duas versões do produto de testes. Na primeira versão com o produto na forma original de projeto, e na segunda, com modificações estruturais realizadas para fortalecer a característica de manutenibilidade fraca, detectada com o método de rastreabilidade proposto pelo modelo (parte 2) e, assim, verificar comparativamente a diferença de avaliação acusada pelo modelo nas duas versões do produto. As figuras O.1, O.2 e O.3 do Anexo O mostram a versão original de projeto do produto utilizado para teste (Ventilador Radial);

Parte 2: Obtidos os valores dos indicadores e índices de manutenibilidade do produto, na versão original, passar-se-á para a aplicação do método de rastreamento (Ver item 4.3.3), detectando-se características fortes e fracas de manutenibilidade, com o objetivo de orientar a escolha de indicadores a serem modificados e, com isto, obter a segunda versão do produto de teste, que também será aplicado ao modelo de avaliação. A versão modificada do produto de teste está apresentada na figura O.4 do Anexo O, que mostra unicamente as partes melhoradas do produto;

Parte 3: Com os valores dos indicadores e índices de manutenibilidade determinado nos produtos da versão original e modificado, passar-se-á para a execução de testes através dos ciclos de desmontagem/ montagem, nas duas versões do produto (original e modificado), para obtenção de parâmetros que permitam mostrar a coerência dos valores obtidos na aplicação do modelo. Estes testes visam verificar o desempenho do produto nas atividades de desmontagem/ montagem para manutenção, ou seja, as facilidades e dificuldades que o produto oferece para realizar esta atividade, redundando no tempo de execução. Assim, os valores escalares dos indicadores e índices de manutenibilidade terão correlação com os tempos obtidos nos ciclos de testes de desmontagem/ montagem, e aplicando-se as ferramentas de análise estatística sobre estes valores (ver Anexo A), obter-se-ão parâmetros como MRT, $M(t)$, α , β , μ , entre outros, que auxiliarão a análise de correlação, com o objetivo

de verificar a funcionalidade e desempenho do modelo na atividade de avaliação da manutenibilidade em produtos/ sistemas. A análise de desempenho é executada na parte 4;

Parte 4: Nesta parte, analisam-se os resultados da avaliação de manutenibilidade obtidos com o modelo (partes 1 e 2), juntamente com os valores obtidos nos testes de desmontagem/montagem e parâmetros estatísticos, determinados por Weibull (parte 3), entre outros valores de referência. Esta análise pretende mostrar a correlação ou coerência dos resultados, através de comentários sobre a funcionalidade e desempenho do modelo. Os próximos itens mostram a forma de execução das partes indicadas na figura 5.1.

5.1- Parte 1: Aplicação do Modelo para avaliar os indicadores e Índices de Manutenibilidade

Esta aplicação dar-se-á nas duas versões do produto de teste (original e modificado; Anexo O). A sequência de execução das diferentes etapas exigidas para aplicação do modelo, no processo de avaliação dos indicadores e índices de Manutenibilidade, está demonstrada na figura 4.26 (Capítulo 4), segundo sete passos mostrados a seguir.

-Passo 1: Através da árvore estrutural do produto mostrada na figura 5.2, identificam-se quais componentes merecem manutenção. Estes componentes indicados com asteriscos (*) são: o conjunto de dois mancais com rolamentos autocompensadores, montados sobre buchas cônicas (chamado de C1), e o conjunto de transmissão com quatro correias em V (denominado de C2). O motor, que também merece manutenção, não será considerado neste trabalho por pertencer a um componente elétrico;

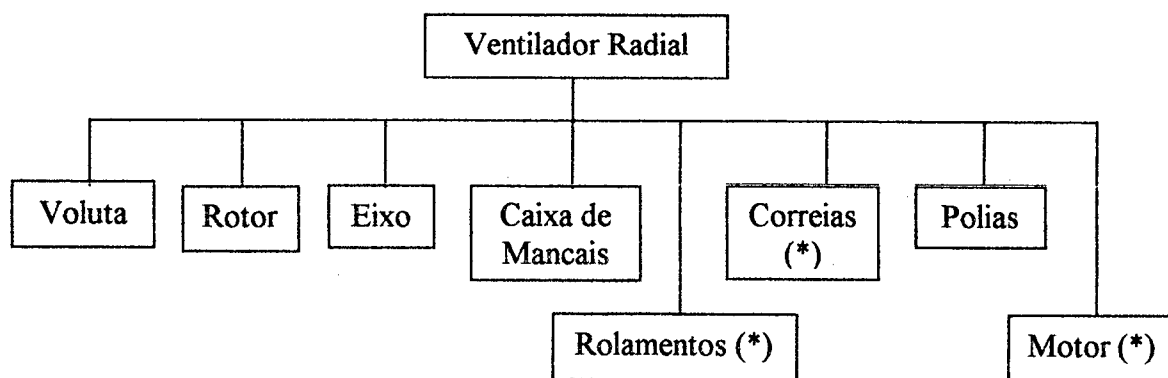


Fig. 5.2- Árvore estrutural do ventilador radial

- Passo 2: A árvore de manutenção com o fluxograma das atividades de desmontagem e montagem para o produto de teste (ventilador) está representado na figura 5.3, mostrando as atividades necessárias para substituir as correias de transmissão e os rolamentos autocompensadores. Nota-se que estas atividades (representadas pelos blocos (a) e (b)), possuem sub-blocos de tarefas comuns como: “sub-bloco 1- Tirar/ esticar correias” e “sub-bloco 2- Tirar/ colocar proteção”;

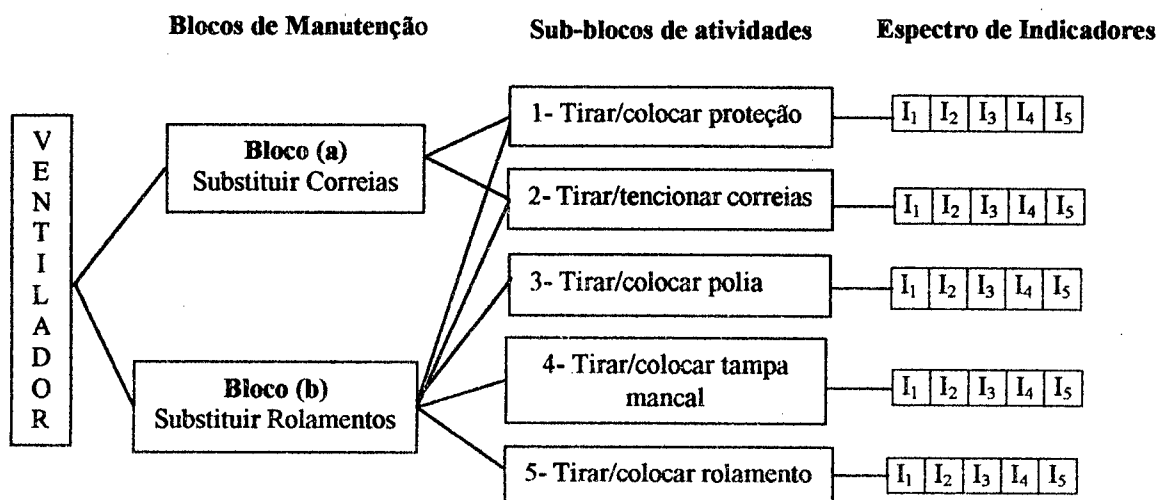


Fig. 5.3- Árvore de manutenção com o fluxograma das atividades de desmontagem/montagem para “Substituir Correias e Rolamentos”.

- Passo 3: Com a aplicação das escalas de valor do modelo, obtidas em 4.2.4 (Figuras 4.15; 4.17; 4.18; 4.19 e 4.20), avalia-se o espectro de indicadores pertinentes (I₁; I₂; I₃; I₄; I₅; pertencentes ao *cluster* “Facilidade de Desmontagem e Montagem”), obtendo-se os valores dos indicadores de manutenibilidade $V_{(li)}$, em cada bloco e sub-bloco de atividades de manutenção (contidos no fluxograma acima), para o produto na versão original, mostrados no Anexo O, Figuras O1; O2 e O3. Os valores dos indicadores pertencentes aos sub-blocos 1 e 2 (correspondente às atividades de manutenção para substituir correias), possuem a mesma avaliação por serem comuns a ambos os blocos (a) e (b) da figura 5.3. A figura 5.4 mostra os valores obtidos para os indicadores do bloco (a) correspondente à atividade para Substituir Correias.

	Bloco (a) - Substituir Correias			
Indicadores de Manutenibilidade	Sub-Bloco 1 Tirar/colocar proteção da correia		Sub-Bloco 2 Tirar/tencionar correias	
	Nível Escalar - N_k	Valor $V_{(i)}$	Nível Escalar - N_k	Valor $V_{(i)}$
1- Tipo de Fixação/ União	Fixação da proteção com 3 parafusos - N3	58,3	Fixação do motor elétrico com 4 parafusos - N2	33,3
2- Simplicidade Estrutural/ F.	Mecanismo convencional - N5	100	Mecanismo convencional - N5	100
3- Acessibilidade e Visibilidade	Totalmente acessível e visível - N5	100	Totalmente acessível e visível - N5	100
4- Alcançabilidade e Manejabilidade	Totalmente alcançável e manejável - N5	100	Totalmente alcançável e manejável - N5	100
5- Ajustagem e Calibragem	Não precisa de ajustagem/ calibragem - N5	100	Ajustagem com dois tensores de rosca com calibragem/ gabarito - N1	0

Fig. 5.4- Valor dos indicadores de manutenibilidade (V_i) para a atividade de manutenção “Bloco (a): Substituir Correias”

A figura 5.4 mostra o processo de avaliação dos sub-blocos 1 e 2, utilizando as funções de valor dos indicadores do modelo, justificando a escolha do valor escalar em função da característica apresentada no projeto. A figura 5.5 mostra os valores obtidos para os indicadores do bloco (b) correspondente à atividade para Substituir Rolamentos, justificando a avaliação de cada indicador como realizado no quadro anterior. Neste quadro, não se justificam os valores dos sub-blocos 1 e 2 por serem idênticos a figura 5.4;

Bloco (b) – Substituir Rolamentos					
	Sub-Bloco1	Sub-Bloco 2	Sub-Bloco 3 Tirar/colocar polia		Sub-Bloco 4 Tirar/colocar tampa ma
Indicador de Manutenabilidade	Valor $V_{(ii)}$	Valor $V_{(ii)}$	Nível Escalar - N_k	Valor $V_{(ii)}$	Nível Escalar - N_k
1- Tipo de Fixação/ União	58,3	33,3	Fixação da polia com um parafuso - N4	83,3	Fixação com 2 parafusos - N
2- Simplicidade Estrutural/ Funcional	100	100	Mecanismo convencional - N5	100	Mecanismo convencional - N
3- Acessibilidade e Visibilidade	100	100	Totalmente acessível e visível - N5	100	Totalmente acessível e visível N5
4- Alcançabilidade e Manejabilidade	100	100	Totalmente alcançável e manejável - N5	100	Totalmente alcançável e manejável - N5
5- Ajustagem e Calibragem	100	0	Não precisa de ajustagem/ calibragem - N5	100	Não precisa de ajustagem/ calibragem - N5
Observação: Os valores correspondentes aos sub-blocos 1 e 2 são os mesmos apresentados na figura 5.4.					

Fig. 5.5- Valor dos indicadores de manutenabilidade (V_i) para a atividade de manutenção “Bloco (b) - S

Passo 4: Com os valores de manutenibilidade $V_{(li)}$ de cada indicador (avaliados no passo anterior para cada sub-bloco de atividades dos blocos (a) e (b)), calculam-se os subíndices de manutenibilidade (SIm) aplicando-se a expressão (4.2), com as taxas de substituição P_i de cada indicador obtidas em 4.2.6 (Figura 4.25). Os valores (SIm)_j a serem calculados correspondem às atividades de manutenção executadas, segundo sub-blocos 1 e 2 do conjunto C_1 (correias de transmissão) e sub-blocos 1; 2; 3; 4; 5 do conjunto C_2 (rolamentos autocompensadores), representadas nos blocos (a) e (b) do fluxograma da figura 5.3.

$$SIm = \sum_i^n V_{(li)} \cdot p_i / 100 \quad (4.2)$$

Com a expressão (4.2), obtêm-se os subíndices de manutenibilidade (SIm)_j de cada atividade de manutenção, mostrando-se a memória de cálculo unicamente para o produto de teste na versão original. Estes cálculos são apresentados para cada sub-bloco de atividade, utilizando-se o subíndice (a)_j e (b)_j, para identificar o bloco, sub-bloco, componente/ conjunto ao qual pertence o SIm.

- Bloco (a) - Sub-bloco (a₁) - Retirar / colocar proteção das correias:

$$(SIm) a_1 = (V_{(11)} \cdot p_1 + V_{(12)} \cdot p_2 + V_{(13)} \cdot p_3 + V_{(14)} \cdot p_4 + V_{(15)} \cdot p_5) / 100$$

$$(SIm) a_1 = (58,3 \cdot 31,48 + 100 \cdot 25,93 + 100 \cdot 20,37 + 100 \cdot 14,81 + 100 \cdot 7,41) / 100$$

$$(SIm) a_1 = 86,87$$

- Bloco (a) - Sub-bloco (a₂) - Folgar/ ajustar e/ou substituir correias:

$$(SIm) a_2 = (V_{(11)} \cdot p_1 + V_{(12)} \cdot p_2 + V_{(13)} \cdot p_3 + V_{(14)} \cdot p_4 + V_{(15)} \cdot p_5) / 100$$

$$(SIm) a_2 = (33,3 \cdot 31,48 + 100 \cdot 25,93 + 100 \cdot 20,37 + 83,3 \cdot 14,81 + 0 \cdot 7,41) / 100$$

$$(SIm) a_2 = 69,11$$

Procedendo-se da mesma forma para o cálculo do SIm nas atividades de manutenção do “bloco b - Substituir Rolamento”, nos sub-blocos b₁, b₂, b₃, b₄ e b₅, obtêm-se os seguintes valores:

$$(SIm) b_1 = 86,87;$$

$$(SIm) b_2 = 69,11;$$

$$(SIm) b_3 = 94,74;$$

$$(SIm) b_4 = 86,87;$$

$$(SIm)b_5 = 91,37$$

- Passo 5: Com o valor dos subíndices de manutenibilidade (SIm) de cada atividade de manutenção (sub-blocos), calcula-se o índice de manutenibilidade local (Im), para cada componente/ conjunto C₁ e C₂ (Blocos a e b). Para isso, aplica-se a expressão 4.3.

$$Im = \sum_{j=1}^n \frac{SIm_j}{n_a} \quad (4.3)$$

Com a aplicação desta expressão, obtêm-se os seguintes valores (Im_u), para os componentes C₁ e C₂, cujo sub-índice (u) identifica o bloco ao qual pertence (blocos (a) e (b)):

- **Componente C₁**; SIm (a₁) = 86,87 e SIm (a₂) = 69,11:

$$Im_a = (86,87 + 69,11) / 2 = 77,99$$

- **Componente C₂**; SIm (b₂) = 86,87; SIm (b₂) = 69,11; SIm (b₃) = 94,74; SIm (b₄) = 86,87; SIm (b₅) = 91,37:

$$Im_b = (86,87 + 69,11 + 94,74 + 86,87 + 91,37) / 5 = 85,79$$

- Passo 6: A frequência de intervenção de manutenção, para cada conjunto, é calculada pela expressão (4.4):

$$F_I = Vuf_p / Vuf_c \quad (4.4)$$

Vida útil física do produto - Vuf_p = 60 meses

Para o conjunto C1 (rolamento autocompensador), com vida útil física (Vuf_{c1} = 20 meses):

$$Fc_1 = 60 / 20 = 3$$

Para o conjunto C2 (correia de transmissão), com vida útil física (Vuf_{c2} = 15 meses):

$$Fc_2 = 60 / 15 = 4$$

A frequência correspondente ao tensionamento da correia pela dilatação durante uso, não é considerada por pertencer a uma atividade de manutenção com pequenos ajustes, que são realizados pelo operador do equipamento (TPM), sem registros de tempo para manutenção;

Passo 7: Para calcular o índice de manutenibilidade global (Img), do produto avaliado, aplica-se a expressão (4.5), substituindo-se os valores do índice de manutenibilidade local (Im_u) de cada componente (C₁ e C₂), obtidos no passo 5 (Im_a = 77,99 e Im_b = 85,79), os valores das

freqüências obtidas no passo 6 ($F_{(1)} = 3$ e $F_{(2)} = 4$), o número de componentes ($N_c = 2$), utilizando-se ($K = 100$); com os quais se obtém:

$$Img = \frac{\sum_u^n Im_u \times (\log_k (K+1 - F_u))}{N_c}$$

(4.5)

$$Img = [77,99 * (\log_{100} 4) + 85,79 * (\log_{100} 3)] / 2 = Img = 81,44$$

O valor de 81,44 corresponde ao índice de manutenibilidade global (Img), obtido para o produto na versão original (Anexo O). O índice, assim obtido, representa a capacidade do produto, para facilitar as atividades de desmontagem e montagem em tarefas de manutenção. Estes cálculos serão facilitados com a utilização de um *software* especializado, que contenha todos os passos do processo de cálculo apresentado, de forma automatizada. A figura 5.6 mostra o conjunto de valores de manutenibilidade obtidos para a versão original do produto de teste.

	Atividades de Manutenção do Bloco (a)		Atividades de Manutenção do Bloco (b)				
Indicador de Manutenibilidade	Sub-Bloco 1	Sub-Bloco 2	Sub-Bloco 1	Sub-Bloco 2	Sub-Bloco 3	Sub-Bloco 4	Sub-Bloco 5
Tipo de Fixação/ União (I ₁)	58,3	33,3	58,3	33,3	83,3	58,3	83,3
Simplicidade Estrutural/ F. (I ₂)	100	100	100	100	100	100	100
Acessibilidade e Visibilidade (I ₃)	100	100	100	100	100	100	100
Alcançabilidade e Manejabilidade (I ₄)	100	100	100	100	100	100	100
Ajustagem e Calibragem (I ₅) ^e	100	0	100	0	100	100	54,5
Subíndice de Manutenibilidade (SI _m)	86,87	69,11	86,87	69,11	94,74	86,87	91,37
Índice de Manutenibilidade Local (I _m)	Im ₁ = 77,99		Im ₂ = 85,79				
Índice de Manutenibilidade Global (I _{mg})	81,44						

Fig. 5.6- Valores de manutenibilidade obtidos para a versão original do produto de teste

Este exemplo, de aplicação, mostra a forma de se trabalhar com o modelo desenvolvido para avaliação dos indicadores de manutenibilidade (que facilitam as atividades de desmontagem e montagem em manutenção) e a obtenção dos índices de manutenibilidade em produtos/ sistemas mecânicos.

5.2- Parte 2: Aplicação do Método de Rastreabilidade para detectar Características Fortes e Fracas de Manutenibilidade

Como foi visto no item 4.4, a aplicação deste método de rastreabilidade visa detectar indicadores de manutenibilidade fortes e fracos no produto analisado. Isto serve para alertar sobre as características que merecem ser melhoradas, visando aumentar o índice de manutenibilidade, melhorando o desempenho nas atividades de desmontagem/ montagem para manutenção e com isto melhorar o projeto do produto/ sistema.

A matriz de rastreamento mostrada na figura 4.27 (item 4.4), necessária para a análise proposta na figura 4.28, possui formato idêntico ao da figura 5.6, que apresenta os valores de manutenibilidade obtidos para a versão original do produto. Assim, utilizando-se esta última como matriz de rastreamento, nota-se que a característica mais fraca do produto analisado encontra-se no indicador de manutenibilidade (I_5) “Ajustagem e Calibragem”, correspondente à atividade de manutenção do Sub-bloco b_2 (tirar/ tensionar correias), pertencente ao conjunto C_2 (correia de transmissão), com valor escalar $N_1 = 0$ (ajustagem com dois tensores de rosca com alinhamento/ calibragem), e índice de manutenibilidade local $Sm_2 = 69,11$.

A análise sugere que o referido conjunto seja melhorado para aumentar o valor de manutenibilidade do indicador correspondente e, por consequência, aumentar o valor do índice de manutenibilidade do produto. Com isso, o produto de teste melhorado, a ser utilizado na segunda versão, apresenta esta única modificação de projeto, em que se reforça o indicador (I_5) “ajustagem e calibragem” pertencente à atividade do Sub-bloco b_2 .

Esta modificação consta de um sistema de base para motor, articulado de forma pendular, onde o estiramento/ ajuste da correia é realizado por um único tensor de parafuso com porca e contraporca que faz a fixação do sistema. Este tensor é projetado e dimensionado, também, para absorver a vibração mecânica. A figura O.4 do Anexo O mostra a forma desta modificação.

Com esta melhoria, a avaliação do indicador (I_5) passa do valor escalar $N_1 = 0$ (ajuste com dois tensores de rosca com alinhamento/ calibragem), para $N_4 = 72,7$ (ajuste com um

tensor de rosca, sem alinhamento), modificação que além de diminuir o número de tensores de dois para um, também, elimina a necessidade de alinhamento das polias. Mas indiretamente esta modificação também influencia o indicador “I₁ – Tipo de fixação/ união” do mesmo sub-bloco 2, que trata da fixação do motor elétrico, em que a modificação do indicador I₅ elimina a necessidade de folgar o motor para executar a atividade de esticar a correia. Com isso, o valor de I₁ deste sub-bloco 2 passa de N₂ = 33,3 para N₅ = 100. Os restantes indicadores que não foram modificados ou influenciados permanecem com o mesmo valor. Recalculando os índices de manutenibilidade SIm, Im e Img de forma idêntica ao produto original, obtêm-se os valores mostrados na figura 5.7, lembrando que os valores dados a cada indicador realizam-se pela comparação da condição de projeto com as escalas de valor apresentadas em 4.2.4, figuras 4.15; 4.17; 4.18; 4.19 e 4.20.

	Atividades de Manutenção do Bloco (a)		Atividades de Manutenção do Bloco (b)				
Indicador de Manutenibilidade	Sub-Bloco 1	Sub-Bloco 2	Sub-Bloco 1	Sub-Bloco 2	Sub-Bloco 3	Sub-Bloco 4	Sub-Bloco 5
Tipo de Fixação/ União (I ₁)	58,3	100 (#)	58,3	100 (#)	83,3	58,3	83,3
Simplicidade Estrutural/ F. (I ₂)	100	100	100	100	100	100	100
Acessibilidade e Visibilidade (I ₃)	100	100	100	100	100	100	100
Alcançabilidade e Manejabilidade (I ₄)	100	100	100	100	100	100	100
Ajustagem e Calibragem (I ₅)	100	72,7(*)	100	72,7(*)	100	100	54,5
Subíndice de Manutenibilidade (SIm)	86,87	97,97	86,87	97,97	94,74	86,87	91,37
Índice de Manutenibilidade Local (Im)	Im ₁ = 92,42		Im ₂ = 91,56				
Índice de Manutenibilidade Global (Img)	91,48						
(*) Ajuste com um tensor de rosca sem alinhamento/ gabarito – N4 = 72,7							
(#) Sem necessidade de fixação – N5 = 100							

Fig. 5.7- Valores de manutenibilidade obtidos para a versão modificada do produto de teste

5.3- Parte 3: Execução do Teste de Desmontagem e Montagem

A realização deste teste tem como função principal verificar o tempo do ciclo de desmontagem/ montagem em cada bloco e sub-bloco de atividade de manutenção necessária para a troca de correias de transmissão e rolamentos (Blocos (a) e (b), figura 5.3). Com os tempos dos ciclos de desmontagens/ montagens, obtidos nos testes (para cada bloco e sub-bloco), calculam-se os parâmetros estatísticos de tempo médio de reparo (MRT), manutenibilidade do produto $M(t)$, Tempo de reparo característico α , Fator de forma β , Taxa de reparo média μ e coeficiente de correlação R (ver Anexo A). Os produtos utilizados para testes (versão original e modificada) estão mostrados no Anexo O.

A execução dos testes de desmontagens/ montagens do produto, será realizada obedecendo-se a procedimentos pré-estabelecidos, os quais determinam:

- a execução das tarefas de desmontagem/ montagem será realizada por um mecânico com nível de habilidade normal (definida em MATOS, 1999), que conhece o produto, tendo à disposição todas as ferramentas necessárias para a tarefa, não existindo necessidade de paralisação da atividade em todo seu ciclo. Todos os testes serão realizados pelo mesmo mecânico;
- O tamanho da amostra será de seis testes (segundo NELSON, 1982; BERGAMO, 1997), em que se praticará o ciclo completo de desmontagem/ montagem de cada bloco e sub-bloco de atividade de manutenção indicado na figura 5.3;
- O tratamento estatístico será realizado através da distribuição de Weibull utilizando o *software* especializado COMODE (LUCHESE et al., 1999);
- Os tempos medidos e calculados com frações decimais são arredondados para 0,5.

A tabela 5.1 mostra os resultados dos testes (tempos de desmontagem/ montagem) para as duas versões de projeto (original e modificada), segundo bloco e sub-blocos de atividades de manutenção da figura 5.3. O teste de desmontagem/ montagem na versão modificada, foi executado apenas para o sub-bloco 2, por ser o único que sofreu modificação. Estes valores são:

- Tempo (em minutos) do ciclo de desmontagem/ montagem para cada sub-bloco de atividade de manutenção da versão de projeto original e modificada;

- Tempo total do ciclo para os blocos: ($a = Sb1 + Sb2$) e ($b = Sb1+Sb2+Sb3+Sb4+Sb5$), nas versões de projeto original e modificada;
- Tempo médio de reparo (MRT), em cada bloco e sub-bloco;
- Manutenibilidade $M(t)$ em cada bloco e sub-blocos de atividade, calculado para o tempo de maior valor no ciclo de desmontagem/ montagem;
- Tempo de reparo característico α , representando o tempo de reparo para uma manutenibilidade $M(t) = 0,632 = (1-1/e)$;
- Fator de forma β ou coeficiente angular da reta logarítmica de Weibull, que representa o tipo de distribuição estatística dos tempos de ciclo em cada bloco e sub-blocos de atividade;
- Taxa média de reparo (μ), representa o número de reparos médios por hora, calculado para a faixa de tempo de: zero até o maior valor no ciclo de desmontagem/ montagem;
- Coeficiente de correlação R , que representa a precisão no ajuste dos parâmetros obtidos.

Os parâmetros estatísticos apresentados são os de maior representatividade neste tipo de análise, podendo ser complementados se desejado (ver Anexo A). Todavia, são necessários outros parâmetros para poder completar o ciclo de análise e comparação de resultados na avaliação de desempenho do modelo, tratados no item 5.4. Estes parâmetros são:

- o custo de fabricação do conjunto “C₂ - correia de transmissão” que possui o indicador de manutenibilidade (I_5) “Ajustagem e Calibragem”, correspondente à atividade de manutenção do Sub-bloco b_2 (tirar/ tencionar correias), nas duas versões de projeto (original e modificada);
- o custo da hora/homem de manutenção para executar as atividades de desmontagem/ montagem (incluindo todos os custos diretos e indiretos).

Os valores dos custos destes dois parâmetros foram levantados na cidade de João Pessoa em maio de 2001, segundo três propostas apresentadas na figura 5.8.

A seguir mostra-se a tabela 5.1, que dá os resultados obtidos nos testes de desmontagens/ montagens do produto.

Tabela 5.1- Valores dos testes de desmontagem/ montagem em: tempos de cada ciclo, TMR, manutenibilidade modificada do produto.

Tempo de Execução em Minutos								
Teste N°	Versão Original							Sub- Bloco
	Sub- Bloco 1	Sub- Bloco 2	Sub- Bloco 3	Sub- Bloco 4	Sub- Bloco 5	Tempo Total Bloco (a) Sb1+Sb2	Tempo Total Bloco (b) Sb1+Sb2+Sb3+Sb4+Sb5	
1	8	15	7	8	23	23	61	9
2	7,5	15	6,5	7	22,5	22,5	58,5	8,5
3	8	14,5	7	7,5	23	22,5	60	9
4	7,5	14,5	6,5	7	22,5	22	58	8,5
5	7,5	14	6	6,5	22,5	21,5	56,5	8,5
6	7,5	14	6	6,5	22,5	21,5	56,5	8,5
MRT	7,66	14,50	6,50	7,08	22,66	22,16	58,41	8,66
M (t)	0,89	0,821	0,821	0,922	0,821	0,903	0,913	0,82
α : Vida característica	7,46	14,64	6,63	7,19	22,64	22,21	59,16	8,63
β	11,63	22,58	10,1	8,8	35,05	36,23	31,91	13,2
μ médio (Reparo/h)	16,98	6,92	14,7	20,05	3,73	6,17	2,47	12,5
R	0,751	0,759	0,759	0,914	0,759	0,942	0,943	0,75

Mostra-se a seguir, a figura 5.8 com os valores dos custos de fabricação e custo da hora/ homem de manutenção em Reais (R\$).

	Custo de fabricação da versão original	Custo de fabricação da versão modificada	Custo da hora/ homem de manutenção
Proposta 1	165,00	275,00	9,50
Proposta 2	200,00	240,00	8,50
Proposta 3	150,00	320,00	10,50
Valor médio	172,00	278,00	9,50
Diferença de custo entre versões = R\$ 106,00			

Fig. 5.8- Valores dos custos de fabricação e custo da hora/ homem de manutenção em Reais (R\$)

No próximo item será tratada a parte correspondente à análise da funcionalidade e desempenho do modelo.

5.4- Parte 4: Análise da Funcionalidade e Desempenho do Modelo

Esta parte é dedicada a análise dos resultados obtidos pela aplicação do modelo, na avaliação da manutenibilidade dos produtos de teste na versão original e modificada. Esta análise pretende mostrar a correlação ou coerência dos resultados obtidos, e tecer comentários sobre a funcionalidade e desempenho do modelo.

Este método de medição quantitativa da manutenibilidade permite obter valores escalares absolutos dos indicadores, introduzidos no projeto de componentes/ conjuntos/ sistemas. Ou seja, estes valores, referem características de projeto do sistema, que podem ser identificáveis e comparáveis com escalas de valor de referência definidas pelo modelo. Entretanto, a comparação de índices de manutenibilidade é compatível, em termos de grandeza (maior/ menor), desde que os indicadores de manutenibilidade que constituem os referidos índices, pertençam à mesma área de especificidade (ex. Facilidade de Desmontagem/ Montagem), e de produtos idênticos, com a mesma função, tamanho e capacidade. Assim, o valor de um índice, indica uma posição relativa da maior ou menor facilidade de manutenção apresentada pelos produtos/ sistemas comparados, nos quais o índice de maior valor, que

indica melhor facilidade de manutenção deverá apresentar menores tempos de execução de manutenção, entre outras vantagens. Isto foi provado nos testes de desmontagem/ montagem apresentados no item 5.3 (Tabela 5.1).

A prática de comparação de indicadores e índices de manutenibilidade, juntamente com outros parâmetros como MRT, manutenibilidade $M(t)$, tempo de reparo característico α , fator de forma β , taxa de reparo média (μ_{med}), custo, etc; fazem parte das técnicas de rastreamento para detectar pontos fortes e fracos de manutenibilidade nos sistemas de manutenção, identificando deficiências e orientando ações de melhorias. Esta comparação será mais completa quando se incluir, também, o custo de ciclo de vida do produto.

Com a experiência realizada para aplicação do modelo aos produtos de teste (original e modificado) para avaliação dos indicadores e índice de manutenibilidade, verificou-se que sua aplicação é rápida e simples, podendo-se melhorar, se utilizado recurso via computador.

Quanto à análise dos valores obtidos (Figuras 5.6 e 5.7), observa-se que dos valores apresentados na figura 5.6 (produto original), foi possível rastrear-se os indicadores fracos, como I_5 com valor zero (Ajustagem e Calibragem), pertencente ao sub-bloco (a_2), que depois de melhorado mudou para 72,7; aumento significativo por ter passado do valor escalar $N_1 = 0$ para $N_4 = 72,7$, segundo função de valor deste indicador. Verificou-se, também, que a modificação do indicador I_5 influenciou diretamente a melhora do indicador I_1 (Tipo de fixação/ união) do mesmo sub-bloco (a_2), que passou do valor $N_2 = 33,3$ para $N_5 = 100$ (ver Figuras 5.4 e 5.5). Por outro lado, em função da análise de rastreamento realizada na figura 5.6, (valores de manutenibilidade do produto melhorado), poder-se-ia aplicar o mesmo processo de melhoria em outros indicadores fracos, como o “ I_1 – Tipo de fixação/ união” nos sub-bloco 1 e 4 com valor $N_3 = 58,3$; não abordados neste trabalho.

A figura 5.9, mostra a evolução dos valores de manutenibilidade no sub-bloco de atividade 2 (tirar/ tencionar correias), pertencentes aos blocos (a) e (b) (figura 5.3), através dos indicadores I_5 (Ajustagem e Calibragem) e I_1 (Tipo de fixação/ união), e índices de manutenibilidade ($SI_{m_{a2}}$), (Im_a) e (Im_g), conseguidos pela melhoria dos indicadores pertinentes (I_5 ; I_1), comparando-se a versão original e modificada do produto. Os outros sub-blocos não apresentam mudanças porque seus indicadores não foram melhorados.

Parâmetros	Sub-Bloco (a ₂) e (b ₂)		Bloco (a)		Bloco (b)	
	valor	%	valor	%	valor	%
Indicador I ₅	De: 0 para 72,7	-	-	-	-	-
Indicador I ₁	De: 33,3 para 100	-				
SubÍndice de Manutenibilidade (SI _m) _{a2}	De: 69,11 para 97,97	41,75	-	-	-	-
Índice de Manutenibilidade Local (Im _a)	-		De: 77,99 p/ 92,42	18,5	De: 85,79 p/ 91,56	6,72
Índice de Manutenibilidade Global (Im _g)	De: 81,44 para 91,48 (12,32 %)					

Fig. 5.9- Evolução dos Valores de Manutenibilidade comparando-se versão Original e Modificada

O aumento de valor nos indicadores melhorados prefere-se indicar como ganho de posição na escala de valor (N1; N2; ..., N5). Os aumentos conseguidos em percentual nos índices de manutenibilidade são significativos, sendo: 41,75 % para o índice SI_m, 18,5% para o índices Im_a e 6,72 % para o índice Im_b (correspondentes aos blocos (a) e (b)), e 12,32 % no aumento do Im_g. Estes percentuais indicam uma evolução de crescimento, porém, não correlacionam significado prático para eventual análise. Entretanto, a decisão e justificação para melhoria dos indicadores fracos são baseadas: no baixo valor escalar apresentado, o custo de reforma e benefícios auferidos em termos de redução nos tempos de manutenção, aumento da disponibilidade e redução do custo de ciclo de vida do produto, entre outros (ver item 2.8).

Todavia, neste processo de análise, vale a comparação dos valores de manutenibilidade com a frequência (F) de intervenção de manutenção, já que como foi colocado no item 4.3, para baixos valores de frequência são admissíveis baixos valores de manutenibilidade e pela expressão 4.5, diminuir a o valor de (F), aumentando a vida útil física do componente/ conjunto/ produto, seria outra forma de aumentar o valor do índice de manutenibilidade, o que não necessariamente signifique a melhorara dos tempos médios de manutenção (MRT), mas ganha-se no tempo total de manutenção durante o ciclo de vida do produto. Para o exemplo apresentado nesta pesquisa, esta alternativa seria possível substituindo-se o uso de correias de transmissão em V convencionais, pelas correias do tipo super HC que possuem maior vida útil física, diminuindo a frequência de troca (F). Uma outra possibilidade seria complementá-lo, através do uso de ferramentas especiais, em lugar de modificá-lo (ver item 2.7). Esta

possibilidade, geralmente, é factível para os indicadores “Acessibilidade/ Visibilidade e Alcançabilidade/ Manejabilidade”. Ou seja, na procura de melhorar a manutenibilidade do sistema de manutenção, é válido ponderarem-se todos os recursos e possibilidades, através de uma análise abrangente (holística) sobre o sistema de manutenção (processo, instalação, produto, mão-de-obra, logística, etc.).

Da análise realizada na tabela 5.1 (item 5.3), em que se apresentam os tempos de execução dos ciclos de desmontagens/ montagens, obtidos dos testes segundo as atividades de manutenção da Figura 5.3, verifica-se que estes tempos são decrescentes, justificados pela seqüência contínua e repetida da tarefa, aumentando o domínio do mecânico na execução. Para este tipo de análise é muito difundida a utilização do tratamento estatístico por Weibull (ver Anexo A), com que se obtêm parâmetros característicos, também, apresentados na tabela 5.1. Esta análise mostra as seguintes particularidades:

- a manutenibilidade apresentada para o tempo de maior valor nos ciclos de desmontagem/ montagem em cada atividade de manutenção (sub-blocos e blocos), mostra a probabilidade para se conseguir estes tempos de execução, situando-se entre 0,82 e 0,92 em que o sub-bloco 4 atingiu o maior valor. O sub-bloco 2 com melhoria (modificado) apresenta o mesmo valor $M(t)$ do produto original. Apesar de não se dispor de valores de referência, interpreta-se que os valores de manutenibilidade $M(t)$ apresentados estão na faixa de aceitação para previsão de tempos de manutenção em produtos/ sistemas convencionais, baseados na experiência profissional do autor deste trabalho, na área de manutenção;
- o tempo de reparo característico (α), que indica o tempo de execução da desmontagem/ montagem para uma manutenibilidade $M(t) = 63,2 \%$, possui importância operacional, pois permite a maioria dos cálculos estatísticos realizados (ver anexo A);
- o fator de forma (β), que indica a forma de distribuição dos tempos de ciclo de desmontagem/ montagem nos testes realizados, mostra uma distribuição fortemente normal variando de 8,8 até 36 (quando $\beta = 3,44$ a função de Weibull se aproxima a uma distribuição normal), significando que os tempos da amostra são muito homogêneos e se concentram próximos do entorno da MRT;
- a taxa de reparo média ($\mu_{méd}$), que indica a quantidade de reparos por hora (no intervalo de zero a $t_{máximo}$), indica uma forte melhora após a modificação de projeto do indicador I_5 no Sub-bloco-2, passando de 6,92 para 12,53. Esta melhora, também, é verificada na taxa de reparo ($\mu_{méd}$), correspondente aos blocos (a) e (b), que incluem o tempo total de ciclo de

montagem/ desmontagem, cujos valores evoluem de 6,17 a 6,63 no bloco (a) e de 2,47 a 2,48 no bloco (b);

- o coeficiente de correlação (R) mostra a aproximação existente entre os tempos da amostra e a reta, que representa a função de Weibull, com valores entre 0,751 e 0,943, identificando uma correlação estatística aceitável para os fins deste trabalho.

Um outro parâmetro complementar importante de análise estatística, da manutenibilidade, é feito através da disponibilidade apresentada pelo produto (ver Anexo A), que não é incluído neste estudo por não se terem os parâmetros complementares para seu cálculo, que são a média do tempo entre falhas (MTBF), a taxa de falhas (λ) e a vida característica (α).

Vale destacar que os modelos de análise estatísticos da manutenibilidade, utilizando os dados históricos de desempenho do produto nas atividades de manutenção, são os comumente apresentados nas bibliografias especializadas (ver Capítulo 2). Complementarmente, o modelo desenvolvido, neste trabalho, contribui com a análise da manutenibilidade, através de seus indicadores no nível de projeto, influenciando os valores históricos de desempenho do produto nas atividades de manutenção, ou seja, o modelo aqui desenvolvido estuda as próprias causas, contrariamente à análise estatística de manutenibilidade que estuda os efeitos deste desempenho. Entretanto, ambos os métodos serão complementares, como ferramentas gerenciais da manutenção.

Por último, a figura 5.10 apresenta os valores de redução obtidos nos tempos médios de desmontagens/ montagens (MRT) e custos de manutenção, com a melhoria do projeto dos indicadores de manutenibilidade.

Sub-Bloco 2			Bloco (a)		Bloco (b)	
Valor MRT	Diferencia	%	Valor MRT	%	Valor MRT	%
14,5 p/ 8,6	5,9 min.	40,6	22,16 p/ 16,33	26,3	58,41 p/ 52,58	9,98
Redução do tempo de manutenção durante o ciclo de vida do produto (5 anos): $6 \text{ minutos} \times 4 + 6 \text{ minutos} \times 3 = 24 + 18 \cong 42 \text{ minutos}$						
Redução do custo de manutenção durante o ciclo de vida do produto: $0,7 \text{ horas} \times \text{R\$ } 9,50 = \text{R\$ } 6,65$						
Diferencia de custo de fabricação entre projeto original e modificado: R\$ 106,00						

Fig. 5.10- Valores de Redução dos Tempos (MRT) e Custos de Manutenção

Desta figura, a comparação do tempo médio de execução das atividades de desmontagens/ montagens (MRT), entre o produto original e modificado, denota que para a atividade de tirar/ ajustar correia (identificado pelo sub-bloco 2 em que foram executadas as melhorias de projeto), houve uma significativa redução de 40,6 %. Estes valores de redução aparecem menos atrativos quando comparados ao tempo total dos ciclos de desmontagens/ montagens, realizadas nos componentes C1 (bloco a) e C2 (bloco b), que apresentam redução de 26,3 % e 9,98 % respectivamente. Isto pode ser justificado porque os tempos observados nesta comparação incluem tempos parciais dos vários sub-blocos de atividades de manutenção da figura 5.3, não todos melhorados em termos de projeto.

Esta atratividade é menor, ainda, quando comparada à redução total do tempo de manutenção (42 minutos) e seu custo, durante todo o ciclo de vida útil do produto que é de \$R 6,65 Reais, com a diferença do custo do produto das versões original e melhorada, que é de \$R 106,00 Reais. Esta comparação verifica que o custo da melhoria do produto não consegue ser compensado com o ganho no custo de manutenção durante todo o ciclo de vida. Entretanto, ganho conseguido com a redução de 6 minutos no tempo do ciclo de desmontagem/ montagem, pode ser importante quando se compara com limitações de tempo de parada, como no caso do ventilador usado para aplicação do modelo, que trabalha na exaustão dos gases de um forno de cerâmica e não pode ficar parado além de 60 minutos.

Isto mostra que a análise de viabilidade da manutenibilidade de um projeto deve ser realizado em função do custo/ benefício, pois vários fatores podem influenciar a necessidade de melhorias de produtos/ sistemas como dependência (serie/ paralelo) no fluxo de processo produtivo, custo do tempo improdutivo, condições de segurança, entre outros.

Finalizando, para melhor situar a importância, desta pesquisa, devem ser consideradas as exigências atuais, para melhorias contínuas nos sistemas de produção e serviços, na procura de melhor produtividade e qualidade, particularmente, no contexto de globalização da economia.

Com esta necessidade de atuação estratégica das organizações, verifica-se a importância e contribuição do modelo, como ferramenta de análise e avaliação da manutenibilidade, auxiliando o projeto e/ou especificação de sistemas de manutenção, na procura do ganho de produtividade dos sistemas de produção, seja através dos ganhos em disponibilidade/ regularidade funcional do produto, seja na utilização da mão-de-obra de manutenção.

No próximo Capítulo, apresentam-se as conclusões finais do trabalho, juntamente com sugestões para trabalhos futuros de pesquisa.

CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES

Apresentou-se o modelo desenvolvido para avaliação dos indicadores de manutenibilidade, que facilitam as atividades de desmontagem e montagem para manutenção e obtenção de índices de manutenibilidade, que representam estas características de projeto, em produtos/ sistemas mecânicos.

Neste trabalho, mostrou-se a preocupação com a disponibilidade, regularidade funcional e custo do ciclo de vida dos sistemas que atendem necessidades de produção e serviços. Para isso, verificou-se que os tempos de manutenção, que influenciam diretamente a disponibilidade e custos do ciclo de vida, são geralmente subestimados, além de pouco previsíveis, devido ao contexto dos sistemas de manutenção comumente utilizados, formados por instalações, processo, produto, mão-de-obra, logística, meio ambiente, entre outros.

Verificou-se, também, que as características de manutenibilidade, que fazem parte direta ou indireta de todo sistema de manutenção, são responsáveis pelos tempos das intervenções de manutenção, seja em reparos, na procura de falhas, em inspeções, lubrificação, limpeza, etc. Estas características ou indicadores de manutenibilidade são, geralmente, mencionados e/ou abordados pelas publicações especializadas de forma incompleta, deixando lacunas por serem preenchidas, ou melhor, explicadas.

Esta situação orientou o presente trabalho para um estudo dos referidos indicadores, em nível de projeto, definindo-os em função de características ou benefícios que proporcionam ao sistema de manutenção, agrupados em *clusters* ou áreas de atuação específicas (itens 2.2 e 2.2.1). Assim, focalizou-se o desenvolvimento de um sistema de avaliação escalar dos indicadores destas características, determinando, através deles, os índices de manutenibilidade que representam o valor comparativo da facilidade de manutenção apresentada pelo produto/ sistema avaliado. Esta comparação é válida unicamente em projetos de/ou produtos que possuam a mesma função, tamanho e capacidade, além de conter o mesmo espectro de indicadores, referenciando, numericamente, o grau de desenvolvimento atingido pelo projeto dos indicadores, segundo escalas de 0 a 100.

O desenvolvimento deste modelo apresenta, como ineditismo, a abordagem de análise de manutenibilidade através de indicadores que representam as características de projeto em

produtos /sistemas, usando-se escalas de valor justificadas, através da metodologia MCDA, com a determinação de índices específicos por atividade de manutenção (SI_m), por componentes/ conjuntos (I_m) e por produto/ sistema (I_{mg}), incluindo-se para este último índice uma correlação da manutenibilidade com a frequência de manutenção.

A contribuição teórica está na construção das escalas de valor para os indicadores de manutenibilidade, a complementação e ordenação dos indicadores, segundo famílias de especificidade de manutenção, e as fórmulas de correlação matemática utilizadas para determinar os índices de manutenibilidade.

As peculiaridades deste modelo consideradas como vantagens são:

- utilização de escalas de valor com descritores semânticos que identificam com facilidade os possíveis níveis de projeto apresentados pelos indicadores, segundo escalas que variam de 0 a 100;
- os indicadores apresentados, (com maior diversidade que os comumente indicados nas bibliografias especializadas), que são agrupados segundo famílias, para analisar a manutenibilidade por especificidade de manutenção (lubrificação, detecção de falhas, desmontagem/ montagem, etc.);
- a análise dos indicadores e seus índices de manutenibilidade se realizam sobre: atividades de manutenção, componentes/ conjuntos e produtos/ sistemas em projeto ou existente;
- o valor do índice de manutenibilidade global do produto (I_{mg}), incluindo a ponderação da frequência de intervenções de manutenção;
- os valores obtidos pelo modelo que permitem ser analisados por rastreabilidade, para detectar pontos fortes e fracos nos indicadores de manutenibilidade do produto/ sistema avaliado;
- os valores escalares dos indicadores ($V_{(Ii)}$) e os três índices determinados pelo modelo (SI_m, I_m e I_{mg}), proporcionando mais alternativas de comparação nos diferentes níveis de projeto do produto (atividade, componente, sistema), facilitando a interpretação e análise dos resultados obtidos.

A desvantagem detectada no modelo, está na interpretação que pode ser dada ao valor absoluto do índice de manutenibilidade, que pode ser comparável entre produtos idênticos (função, tamanho, capacidade, etc.), com o mesmo espectro de indicadores.

Demonstrou-se assim, a contribuição deste modelo de avaliação, como ferramenta eficaz na avaliação da manutenibilidade sobre atividades de manutenção, componentes/conjuntos e sistemas, através da medição escalar dos indicadores e sua representação pelos índices de manutenibilidade.

Mostrou-se como esta avaliação permite praticar o rastreamento das características de manutenibilidade, que tornam projetos de produtos, incompatíveis com as necessidades desejadas de desempenho nas atividades de manutenção, sejam: tempos de manutenção, disponibilidade, regularidade funcional, custo de ciclo de vida, etc.

Verificou-se também, que o modelo atua como instrumento para análise e avaliação de mudanças ou melhorias, auxiliando o projeto e/ou reforma de produtos/ sistemas, tornando-se uma ferramenta importante para otimizar sistemas de manutenção existentes ou em fase de projeto.

No contexto do gerenciamento da manutenção moderna, a “Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM”, utiliza processos de rastreamento, monitoração e análise de tendências, através de ferramentas estatísticas (Weibull), FEMEA, FTA, Análise de Riscos, etc., visando melhorar a confiabilidade das instalações para diminuir a incidência de falhas. De forma análoga, poder-se-á pensar em utilizar processos de gerenciamento, utilizando a análise dos valores determinados por este modelo (V, SI_m, Im e Img), através da matriz de rastreamento, ou similares, para detectar/ selecionar produtos/ sistemas de uma instalação em projeto ou existente, que precisem melhorar suas características de manutenibilidade para aprimorar os tempos de manutenção e o custo do ciclo de vida de produtos/ sistemas, entre outros parâmetros de desempenho. Esta técnica pode ser denominada de “Manutenção Centrada em Manutenibilidade”.

Com isso, considera-se que o trabalho apresentado atingiu os objetivos iniciais propostos com resultados satisfatórios, contribuindo com um modelo de avaliação de manutenibilidade em nível de projeto, ferramenta importante para análise e especificação de sistemas de manutenção.

6.1- Sugestões para Trabalhos Futuros

Em função dos estudos para elaboração dos temas abordados, neste trabalho, e execução do modelo apresentado, propõem-se as seguintes sugestões para futuras pesquisas:

- Desenvolver funções de valor e suas taxas de substituição para indicadores de manutenibilidade de outras áreas de manutenção apresentadas no item 2.2.1;
- Desenvolver trabalhos sobre projetos de indicadores de manutenibilidade objetivando melhorar as opções convencionais;
- Desenvolver trabalhos sobre ferramentas especiais que melhorem e/ou complementem indicadores de manutenibilidade sem reformas de projeto no produto;
- Desenvolver ferramentas de rastreabilidade para monitorar desempenho de sistemas de manutenção, aplicando o modelo de avaliação da manutenibilidade em nível de projeto, aliado a outros recursos como análise de valor, parâmetros de desempenho como disponibilidade, regularidade funcional, custo do ciclo de vida entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- ABRAMAN -Associação Brasileira de Manutenção. **A situação da Manutenção no Brasil**. Documento Nacional. Rio de Janeiro, 1997.
- ABRAMAN -Associação Brasileira de Manutenção. **A situação da Manutenção no Brasil**. Documento Nacional. Rio de Janeiro, 1990.
- ALVAREZ, O. E. **Manual de Manutenção Planejada**. João Pessoa: Editora Universitária / UFPB, 1988.
- ALVAREZ, O. E. **Análise das Características Ergonômicas na Função do Mecânico de Manutenção**. João Pessoa: Trabalho da Disciplina Engenharia Ergonômica do Trabalho. Curso de Doutorado Inter-Institucional, UFSC – UFPB, 1997.
- ALVAREZ, O. E. e POSSAMAI O. **Ferramentas Especiais como complemento à Manutenibilidade em sistemas Mecânicos: 15º. Congresso Brasileiro de Manutenção: ABRAMAN, Vitória, ES, Setembro 2000.**
- BACK, W. e FORCELLINI, F. A. **Projeto de Produtos**. Apostila de Aulas. UFSC / NeDIP, 1997.
- BANA E COSTA, C.; CORTE, J. M. de; VASNICK, J. C. **Software (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique): Versión 1.1, 1997.**
- BANA E COSTA et al. **Uma Nova Abordagem ao Problema de Construção de uma Função de Valor Cardinal: Macbeth**. *Investigação Operacional*, vol. 15; pp. 15-35, junho 1995.
- BARCLAY, S. H. **VIEW. Software Package**, London: London School of Business, 1984.
- BARROS Fº, Luis Cordero. **Modelo de decisão Aplicados à Avaliação da Manutenibilidade: O Caso Telecomunicações da Chesf**, Dissertação de Mestrado. Dto. Eng. Eletrônica e Sistemas. UFPE, Recife, 1995.
- BERGAMO, Valentino Filho. **Confiabilidade Básica e Prática**. S. Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1997.
- BLANCHARD, B. S. e LOWERY E. E. **Maintainability Principles and Practices**. McGraw-Hill Book Co. New York, 1969.

- BLANCHARD, B. S. et al. **A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management**. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- CARTER, Tony. **Life cycle Support Sistem**. Sydney: Prepared by AD Carter. Tallowillow Enterprises Pty Limited. 14/03/1999.
- CASCONE, N. R. **Metodologia para Análise e Otimização da Confiabilidade, da Manutenibilidade, e da Disponibilidade de um Processo Contínuo de Produção**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. FEM-UNICAM. Outubro de 1992.
- CLARO, Jose Roberto. **Redução de Custos na Manutenção**. Trabalho de Formatura. Departamento de Engenharia de Produção. Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, 1977.
- DUTRA, A. **Elaboração de um Sistema de Avaliação de Desempenho dos Recursos Humanos da S.E.A. à luz da Metodologia Multicriterio de Apoio à Decisão**. Dissertação de Mestrado, UFSC- PPGP, Florianópolis, 1998.
- ENSSLIN, L. et al. **Metodologias Multicritérios em Apoio à Decisão**. Apostila: UFSC-EPS, Florianópolis, 1998.
- HELMAN, H. e ANDERY, P. R. P. **Análise de Falhas / Aplicação dos Métodos de FEMEA / FTA**. Serie Ferramentas da Qualidade / Volume 11. Fundação Cristiano Ottoni, UFMG, Belo Horizonte, MG, 1995.
- LUCESI, Kátia et al. **COMODE**. Software: Confiabilidade, Modelos de Ensaio. FEM-UNICAMP. Departamento de Mecânica. Campinas, 1999.
- MAJOROS, Anthony E. et al. **Handbook of Human Factors and Ergonomics**. Chapter 47. Maintainability. Gravriel Salvendy Ed. N. York: Printed by Wiley-Interscience Publication, 1997.
- MANUTENÇÃO. **Revista Oficial da Abramam**: N° 80, Março/ Abril 2001.
- MATOS, F. F. de Carvalho. **Metodologia para Planejamento e Estruturação de Sistemas de Manutenção de Frota Automotiva**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, S.C., 1999.
- MIL- Military Standards - STD- 471-A. **"Maintainability Verification, Demonstration and Evaluation"**. Department of Defense of the Navy. Washington D.C. Dec. 1978;

- MIL- Military Standards - STD-470-B. **Maintainability Program for Systems and Equipment**. Department of Defense, Washington D.C, Jan. 1983.
- MIL- Military Standards Handbook - HDBK-472. **Maintainability Prediction**. Department of Defense of the Navy. Washington D.C. 20360, 1984.
- MIRSHAWKA, Victor e OLMEDO N. L. **Manutenção- Combate aos Custos da não Eficácia**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1993.
- MONCHY, F. **A Função Manutenção**. São Paulo: Durban, 1989.
- NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM**. São Paulo: IMC, 1989.
- NELSON W. **Applied Life Data Analysis**. New York: John Willey & Sons, Inc, 1982.
- PALLEROSI, Carlos Amadeu. **Confiabilidade, Manutenibilidade, e Disponibilidade de Componentes e Sistemas**. Apostila: FEM-UNICAM, Campinas, 1993.
- PATTON, J. D. **Maintenability and Maintenance Management**. 3d Edition. s. l.: Isa, 1994.
- RAVEN, Industria e Comercio Ltda. **Catálogo de Produtos: Ferramentas Especiais**. São Paulo:---,1999.
- SANTOS, Neri dos e FIALHO, F. A. P. **Manual de Análise Ergonômica do Trabalho**. Curitiba: Gênese, PR, 1995.
- SELIVANOV, A. I. **Fundamentos de la Teoría de Envejecimiento de las Maquinas**. Moscú: Mir, 1972.
- SOUSA, A. Gomes de. **Estudo e Análise dos Métodos de Avaliação da Montabilidade de Produtos Industriais no Processo de Projeto**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, S.C., 1998.
- WANI, M.F. / Gandhi O.P. **Development of manitenability Index for Mechanical Systems**. Reability Engineering and Sistem Safety 65 (259-270): Elsevier Science, 1999.

BIBLIOGRAFIA

- AHLMANN H. **Maintenance Effectiveness and Economic Models in the Terotechnology Concept**. Lund University of Technology. Lund (Sweden), 1984;
- ALVAREZ Martín Cuestas. **Fiabilidad, Mantenimiento y Mantenibilidad de los Equipos Industriales de los Modos de Transporte**. 3°. Congreso Iberoamericano de Mantenimiento. Rio de Janeiro. Brasil, 1983;
- BAUER Miroslav. **Designing Machines for Repair and Maintenance Safety**. Elsevier Science Publishers. Maintenance Management International 5. Prague (Czechoslovakia), 1985.
- BEQUEST, Frank Radcliffe. Based on a paper: **Design for Maintainability, A Creative and Analytical Challenge**. In Seminar: Reliability, Maintainability and Accessibility. I. Mech. E. London, UK, Nov. 1989.
- DHILLON, Balbir S. **Engineering Maintainability: How to Design for Reability and Easy Maintenance**. S. l., 1999.
- EVANS, J. **On the Use of Maintainability Criteria in Contractual Design Requirements** *Maintenance Management International*: n. 7, pp. 85-92. s. l., 1988.
- GERAERDS W. M. J. **The Cost of Downtime for Maintenance: Preliminary Consideration**. Eindhoven University of Tecnology. Department of Industrial Engineering and Management Science. Eindhoven (Netherlands), 1985;
- GOEMINNE, J. and WILLIAMS, J. R. R. **A Method of Plant Design Evaluation Including Maintainability and Reliability**. Proc. I. Mech. E., Pt. E, Jnl. of Process Mechanical Engineering. Vol. 212, E 2, pp. 71- 80, s.l., 1998.
- GOEMINNE, J. **The Design Review of Engineering Systems, Including Maintainability and Reliability**. Using Parameter Profiles” Int. Conf. Engg. Design (ICED 93). The Hague, Netherlands, Aug. 1993.
- GOLDMAN, A . S. and SLATTERY, T. B. **Maintenability: A Major Element of System Effectiveness**, Huntington, New York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1977.
- HUSBAND T. M. e BASKER B. A. **Optimising Maintenance/ Production Systems**. Department of Mechanical Engineering, Imperial College. London (U.K.), 1982;

KAPUR, K. C. et al. **Reliability in Engineering Design**. New York: John Wiley & Sons (Ed.), 1977.

KECECIOGLU, Dimitri. **Maintenability, Availability and Operational Readiness Engineering**. s. l., 1999.

Maintainability in the Design of Process Plant, Design. In: I. Chem. E. Symposium, Univ. of Aston; Birmingham; pp. 1-6.; U.K., Sept. 1988.

MC KINNEY, M. A **Survey and Analysis of Process Plant Maintainability Problems**. Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 203, E1, pp. 29-35. s. l., 1989.

NAKAJIMA S. **The Organization of Maintenance in Japanese Industry**. Japan Institute of Plant Engineers. Kyoritsu Building 3-1-22. Shiba Koen. Minato-ku. Tokio (Japan), 1982;

POULSEN L. **Simulating Maintenance Work in a Fully Loaded Machine Shop: A Model**. Laboratory of Process and Production Engineering. Technical University of Denmark, Building 425, DK-2800. Lyngby (Denmark), 1984;

UETZ, H. **Maintainability of Production Systems, Maintenance Management International**. 4- 55- 68; Netherlands, 1983.

VUJOSEVIC R. et al. **Simulation, Animation, and Analysis of Design Disassembly for Maintainability Analysis**. Intl. J. Production Research. 33 (11): 2999-3022, 1995;

WILLIAMS, J. R. R. **The Qualitative Assessment of Maintainability and Reliability for Plant Review Studies**; 13th ARTS Advances in Reliability Technology Symposium. Manchester University, April 1998.

ANEXO A

CONCEITO ESTATÍSTICO DE MANTENABILIDADE

Apresenta-se a seguir o conceito estatístico de manutenibilidade, com as formas matemáticas mais convencionais e definição de seus fatores, utilizadas para medir o desempenho de produto/ sistema nas atividades de produção e manutenção (CASCONI, 1992; PALLEROSI, 1993).

Pelas definições apresentadas no Capítulo 2, pode-se sugerir para este trabalho o seguinte conceito de manutenibilidade:

“As características de Manutenibilidade, incluídas no sistema de manutenção (equipamento, processo, instalação, organização, e mão de obra, logística, ambiente, entre outras), determinam a facilidade na execução dos serviços, fazendo com que os tempos de intervenção sejam mínimos e previsíveis, mais baratos, com qualidade, seguros e sem riscos de agredir o meio ambiente, inclusive eliminando na medida do possível a necessidade de manutenção”.

Também foi visto que se pode definir o conceito de manutenibilidade de forma estatística como:

$$M(t) = \text{Prob. } TR < TE. \quad (A.1)$$

Onde: TR é o tempo real do serviço;

TE é o tempo estimado.

Pode-se estabelecer uma analogia do conceito estatístico sobre a confiabilidade.

Para representar estes conceitos estatísticos se escolhe a expressão de Weibull, por entender-se ser a forma mais comum e prática para este tipo de estudo, pois além de versátil e de boa precisão, possui outras características, como a de permitir tamanho de amostras reduzido, entre 5 e 15 elementos (NELSON, 1982; BERGAMO, 1997), e representar todos os tipos de distribuição entre outras.

Assim, a função de densidade de probabilidade é:

$$f(t) = \beta / \alpha \cdot (t / \alpha)^{(\beta-1)} \cdot e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (A.2)$$

β : Fator de forma da expressão de Weibull;

α : Vida útil característica do produto;

t : Tempo hipotético.

A taxa de falha instantânea, também denominada intensidade de falha, é representada pelo número de falhas por unidade de tempo:

$$\lambda_{(t)} = \beta / \alpha \cdot (t / \alpha)^{(\beta-1)} \quad (\text{A.3})$$

Substituindo-se em (A.3) pelo valor da taxa de falha característica ($\lambda_0 = 1/\alpha$), tem-se:

$$\lambda_{(t)} = \beta \cdot \lambda_0^\beta \cdot t^{(\beta-1)} \quad (\text{A.4})$$

A taxa de falha média no intervalo de tempo de $(0, t)$, esta dada por:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot t^{(\beta-1)} \quad (\text{A.5})$$

A confiabilidade que esta associada à probabilidade do componente ou sistema não falhar até o tempo (t) é:

$$R_{(t)} = e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (\text{A.6})$$

Onde β é o parâmetro de forma e α representa a vida característica para: $R = 0,37 = 1/e$

A fig. A.1 representa as diferentes formas do parâmetro β , segundo seu valor.

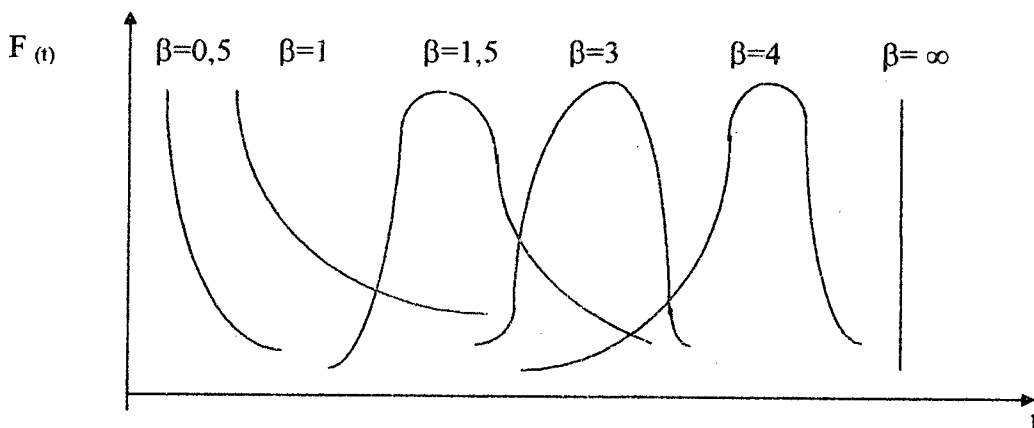


Figura A.1: Curvas de distribuição de probabilidade segundo o valor β

$\beta = 0,5$: Hiper-exponencial (amaciamento)

$\beta = 1$: Exponencial (vida plena)

$\beta = 1,5$ a $2,5$: Normal deslocada (fadiga)

$\beta = 3$ a 4 : Normal (desgaste)

$\beta = \infty$ Ideal

Por analogia ao exposto acima podemos colocar a função densidade de probabilidade de reparo como:

$$f_{(t)} = \gamma / \alpha_r \cdot (t / \alpha_r)^{(\gamma-1)} \cdot e^{-(t/\alpha_r)^\gamma} \quad (\text{A.7})$$

Onde γ : fator de forma e α_r o tempo de reparo característico.

Tirando da expressão (A.7) a relação: $1 / \alpha_r = \mu_o$ (Taxa de reparo característica)

A função densidade de probabilidade de reparo fica:

$$g_{(t)} = \gamma \cdot \mu_o^\gamma \cdot t^{(\gamma-1)} \cdot e^{-(\mu_o \cdot t)^\gamma} \quad (\text{A.8})$$

Com isto, a taxa instantânea de reparo que representa o número de reparos por unidade de tempo fica:

$$\mu_{(t)} = \gamma \cdot \mu_o^\gamma \cdot t^{(\gamma-1)} \quad (\text{A.9})$$

A taxa de reparo média no intervalo de tempo de $(0, t)$, esta dada pela expressão:

$$\mu = \mu_o^\gamma \cdot t^{(\gamma-1)} \quad (\text{A.10})$$

A não manutenibilidade, que representa a probabilidade do componente ou sistema não ser recolocado em serviço no tempo (t) , vale:

$$N_{(t)} = e^{-(\mu_o \cdot t)^\gamma} \quad (\text{A.11})$$

Onde, γ é o parâmetro de forma da expressão de Weibull e μ_o é a taxa de reparo característica para: $N_{(t)} = 0,37 = 1 / e$

A manutenibilidade que esta associada à probabilidade do componente ou sistema ser colocado em serviço até o tempo (t) vale:

$$M(t) = 1 - e^{-(\mu_o \cdot t)^\gamma} \quad (\text{A.12})$$

Quando β ou $\gamma = 1$, tem-se a distribuição exponencial, resultando:

$$\lambda: \text{taxa de falha} = \frac{1}{\text{MTEF}} \quad (\text{quando } \lambda = \text{cte.}, \text{ por que } \beta=1);$$

MTEF: Tempo médio entre Falhas;

$$\mu: \text{Taxa de Reparo} = \frac{1}{\text{MRT}} \quad (\text{quando } \mu = \text{cte.}, \text{ por que } \gamma=1);$$

MRT: Tempo médio de reparo.

Veja-se outros parâmetros também interessantes para o estudo da manutenibilidade:

$$\text{Percentual de Manutenção} = \frac{\text{MRT}}{\text{MTEF}} \times 100 = \frac{\lambda}{\mu} \times 100 \quad (\text{A.13})$$

A disponibilidade que está associada à probabilidade do componente ou sistema estar disponível quando a função for exigida aleatoriamente no intervalo de tempo (t), esta definida por:

$$\text{Disponibilidade: } D_{(t)} = \frac{\text{MTEF}}{\text{MTEF} + \text{MTP}} = 1 - \text{ID}_{(t)} \quad (\text{A.14})$$

Onde, MTP: Tempo médio de parada;

$$\text{ID}_{(t)}: \text{Indisponibilidade} = \frac{\text{MTP}}{\text{MTEF} + \text{MTP}} \quad (\text{A.15})$$

Com isto, a Disponibilidade pode ser indicada como:

$$D_{(t)} = \frac{1}{1 + (\lambda m \cdot \text{MTP})} \quad (\text{A.16})$$

E quando o valor de $\text{MTP} = \text{MRT}$; tem-se:

$$D_{(t)} = \frac{1}{1 + (\lambda m \cdot \text{MRT})} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda m}{\mu m}} = \frac{\mu m}{\mu m + \lambda m} \quad (\text{A.17})$$

Onde, μm : taxa média de reparo

De forma análoga, à indisponibilidade é:

$$ID_{(t)} = \frac{\lambda m}{\lambda m + \mu m} \quad (A.18)$$

Com este enfoque pode-se escrever que a probabilidade de disponibilidade $P_{(D)}$ esta dada como:

$$P_{(D)} = \frac{\lambda m}{\lambda m + \mu m} + \frac{\mu m}{\lambda m + \mu m} \cdot e^{-(\lambda m \cdot t)} \cdot e^{-(\mu m \cdot t)} \quad (A.19)$$

Cabe lembrar que a forma da expressão (A.19) só é valida quando a distribuição é exponencial ($\beta=1$; $\gamma=1$), e assim, das expressões (A.6; A.11; A.17 e A.18), tem-se a expressão (A.20), que de forma geral é:

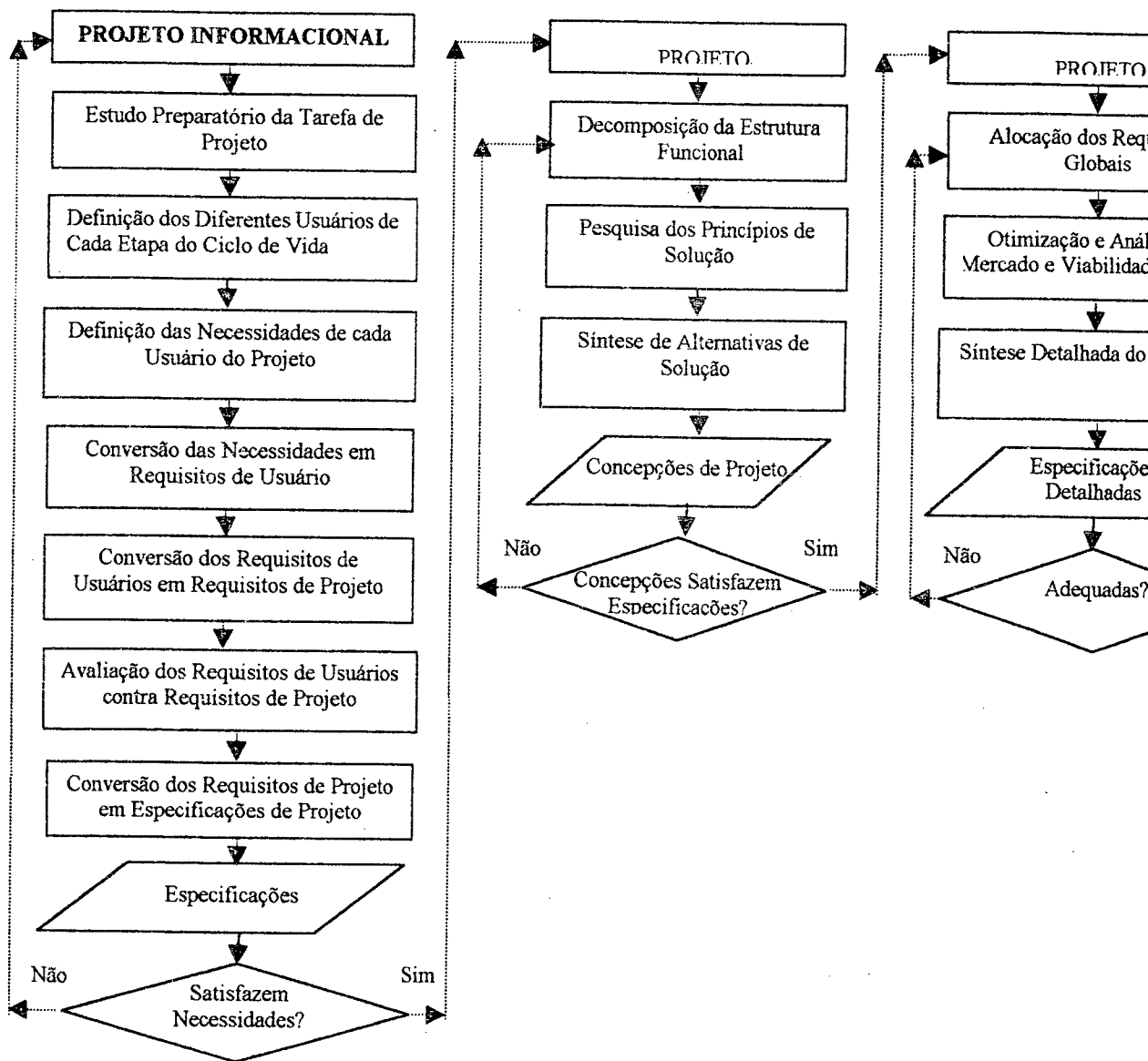
$$P_{(D)} = ID_{(t)} + D_{(t)} \cdot R_{(t)} \cdot N_{(t)} \quad (A.20)$$

A confiança $C_{(t)}$ (*Dependability*), é a medida da probabilidade da condição funcional de um sistema ou partes do mesmo, que esta disponível para operar durante o tempo de ciclo da missão, dada por:

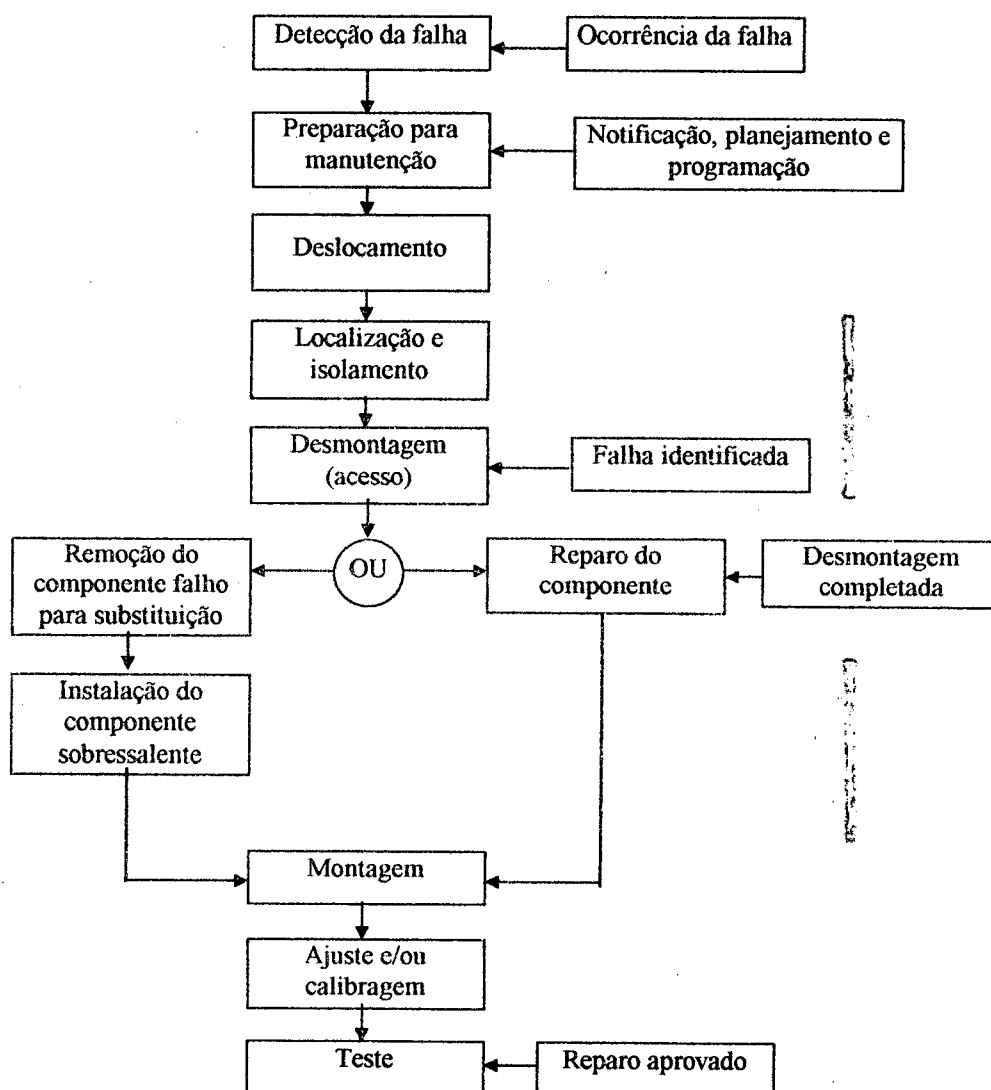
$$C_{(t)} = R_{(t)} + M_{(t)} \cdot (1 - R_{(t)}) \quad (A.21)$$

Com isso demonstra-se como a manutenibilidade, juntamente com a confiabilidade, está engajada na disponibilidade, cujo resultado pretende-se influenciar com o estudo deste conceito em nível de projeto, especificamente com o modelo de avaliação da manutenibilidade que este trabalho desenvolve.

ANEXO B- Metodologia de Projeto adotada no NeDIP (BACK e FORCELLINI, 1997; MATOS, 1999)



ANEXO C – Fluxograma do Ciclo Geral das Atividades da Manutenção Corretiva



Fonte: (Blanchard et al., 1995, p. 100)

ANEXO D - Check-List Generalizado para Análise de Manutenibilidade

I- Verificação da manutenibilidade no aspecto geral

- 1.- A estandardização dos componentes foi maximizada?
- 2.- Os componentes estão agrupados por função e em seqüência?
- 3.- O leiaute de consoles de comando é otimizado?
- 4.- A complexidade é minimizada?
- 5.- Sistema de auto teste é incorporado?
- 6.- O tempo máximo de reparo foi minimizado?
- 7.- Ferramentas e equipamentos de teste foram minimizados?
- 8.- Se utiliza rótulos e/ou símbolos para identificar partes importantes do sistema?
- 9.- São conhecidos os requisitos de calibração e ajustagem?
- 10.- Se aplica a política de reparar ou descartar segundo avaliação técnico-econômica?
- 11.- Procedimentos de manutenção são conhecidos?
- 12.- Necessidades de pessoal, em quantidade e habilidade, são otimizadas?
- 13.- Existe um estudo de mercado documentado?

II- Requisitos de Manipulação

- 1- São utilizados equipamentos para elevação e/ou posicionamento de homens e objetos até o local de trabalho?
- 2- Manipuladores para extração, são empregados (extratores de polias, rolamentos, etc.)?
- 3.- Manipuladores para montagem, são empregados (dilatadores por aquecimento, contração por resfriamento, prensas, etc.)
- 4.- Existem etiquetas de identificação para a manipulação de consoles?

III - Complexidade

- 1.- O número de partes e componentes são minimizadas?
- 2.- Cada parte e componentes tem absoluta necessidade ou função?

- 3.- Os procedimentos para manutenção como ajustagem, regulagem, etc., são dificultados ou justificados?

IV - Requisitos para tempo de reparo

1. - Existem equipamentos para minimizar tempos através de:
 - a- diagnóstico e localização rápida e correta de falhas?
 - b- máxima acessibilidade para facilitar a remoção e substituição de componentes?
 - c- Os sistemas e subsistemas requerem mínimo tempo para teste, incluindo o tempo para aquecimento?
- 2.- Os tempos necessários para solda e fixação são minimizados através de:
 - a- uso de fixações rápidas tipo engate rápido, presilha, elementos com um giro, etc?
 - b- uniões por parafuso do tipo prisioneiro para evitar o uso de duas ferramentas para solda (chave de giro e contra giro), além de parafusos soltos durante a desmontagem?
 - c- componentes auto posicionáveis e identificados?

V - Ferramentas auxiliares e equipamentos para teste

- 1.- A quantidade de ferramentas auxiliares e equipamentos de teste são minimizados e seus tipos estandardizados?
- 2.- Os equipamentos de teste e ferramentas são de fácil operação e o tempo para completar a tarefa é mínimo?
- 3.- As ferramentas e equipamentos de teste fora do peculiar ou não estandardizados podem ser substituídos ou eliminados?

Fonte: (Adaptado de Blanchard et al., 1995, p. 439)

ANEXO E - Síntese dos Programas de Suporte à Análise e Projeto de Manutenibilidade por Computador

E.1- Programa para Predição de Manutenibilidade (MPP-Maintainability Prediction Program); Este programa pode ser utilizado para predição de manutenibilidade em produtos/sistemas elétricos, eletrônicos, eletromecânicos e mecânicos, calculando: tempos médios de reparo (MRT), tempos máximos de manutenção (TMM), tempo médio de manutenção por hora de operação (MMT/ OH), entre outros parâmetros. Inclui fatores para cálculo como: tempos para reparo, desmontagem-montagem, detecção de falha, ajustagem e regulagem, *check-out* entre outros. Este programa obedece às normas militares MIL- HDBK- 472.

Referência: *Powertronic Sistem, Inc. 13700 Chef Menteur Highway, P.O. Box 29109, New Orleans, LA 70189* (Apud, BLANCHARD et al, 1995).

E.2- Programa para Análise Crítica do Modo e Efeito de Falhas (FME, Failure Mode Effects); Este programa pode ser utilizado para análise, com desenvolvimento do FMECA (Procedures for Performing a Failure Mode, Effect, and Criticality Analysis) em produtos/sistemas, definindo hierarquia de prioridades em 25 níveis de conjuntos, subconjuntos e componentes. O FME permite determinar: modos de falha; percentagem de contribuição; efeito local e efeito sobre o sistema; frequência de ocorrência; classificação de severidade; método para detecção de falha e recomendações para a inclusão de atividades de manutenção necessárias. Uma edição universitária esta disponível para uso em instrução. Este programa obedece às normas militares MIL- STD- 1629-A, do departamento de defesa, Washington DC. Referência: *Powertronic Sistem, Inc. 13700 Chef Menteur Highway, P.O. Box 29109, New Orleans, LA 70189* (Apud, BLANCHARD et al, 1995).

E.3- Editor para desenvolvimento de requisitos orientado para projeto/especificação de sistemas (RDD-100; Requirements Driven Development System Designer/Requirements Editor): Este programa é empregado para desenvolver modelagem na avaliação de vários projetos alternativos e para avaliar o comportamento do sistema. Esta abordagem utiliza diagrama funcional de blocos para descrever sequência e atividades afins, requisitos de entradas/saídas, fluxo de dados e fluxo de itens físicos; auxiliando a decomposição em blocos do sistema. RDD é um método de engenharia de sistemas, auxiliado por uma ferramenta de computação através da linguagem de modelagem gráfica executável, e desenvolvida para assistir o engenheiro em projeto de sistemas complexos, através da análise e atribuição de

funções. Recursos do principal módulo do editor, em método de melhoramento, permitem extração de informação do banco de dados, na edição de requisitos padrões, para subsequente modelagem. Modificação posterior dos requisitos de edição podem ser retirados do banco de dados padrão, com a resolução em relação de requisitos preexistente.

Referência: Ascent Logic Corporation, 180 Rose Orchard Way, Suite 200, San José, CA 95134 (Apud, BLANCHARD et al., 1995).

E.4- Auxílio por Computador a Engenharia de Sistema (CORE, Computer-Aided System Engineering). Este programa é um modelo de aproximação e ferramenta automatizada para análise e avaliação de alternativas de projeto, utilizando análise de diagrama funcional de fluxo e modelagem de linguagem executável.

Referência: Vitech Corporation, 2422 Rocky Branch Road, Vienna, VA 22181 (Apud, BLANCHARD et al., 1995).

E.5- Sistemas de simulação em realidade virtual, que permite visualizar um modelo em três dimensões e interagir com este, navegando-se através do programa de computador, simulando qualquer situação de manipulação com o modelo.

Referência: InSys Rolls-Royce-VSEL immersion/projection text bed for virtual maintenance evaluations (Apud MAJOROS, 1997).

E.6- Sistema de Análise de Custo em Projeto de Equipamentos (EDCAS, Equipment Designer's Cost Analysis System). Este programa é uma ferramenta para projeto de equipamentos e pode ser usadas para análise do nível de reparo, incluindo a capacidade para avaliação do reparo versus decisão de descartabilidade, com capacidade de manipulação de 3500 itens concorrentes. Esta análise pode ser realizada em dois possíveis níveis do sistema e o resultado usado para otimizar a quantidade de peças de reposição e na execução da análise do custo do ciclo de vida. Este programa obedece as normas militares MIL- STD- 1390B, Level of Repair, do departamento de defesa, Washington DC. Este programa está disponível em versão resumida para uso universitário.

Referência: *Sistem Exchange, Inc., 170 17th street Pacific Grove, CA 93950* (Apud, BLANCHARD et al., 1995).

E.7- Programa para calcular o custo do ciclo de vida (LCCC, Life-Cycle Cost Calculator). Este programa auxilia a análise e determinação do CCV usando a metodologia CBS. Objetivos e atividades são vinculados a recursos necessários, determinando custos de

manutenção por item e/ou sub-item funcional do produto/sistema, fornecendo um mecanismo para a locação de custo por categoria e seu controle. Tem capacidade para identificar a contribuição de cada custo a qualquer nível do CBS.

Referência: Sistem Engineering Design Laboratory, 146 Whittemore Hall, Colleg of Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061 (Apud, BLANCHARD et al.).

E.8- Disponibilidade PC. Este modelo utiliza a análise de Markov para estudar a influência de taxas de falha (λ), taxas de reparo (μ) e suporte logístico sobre a disponibilidade do sistema. Destina-se para fornecer assistência no desenvolvimento e otimização na configuração de projetos de sistemas e políticas de reparo.

Referência: Management Sciences, Inc., 6022 Constitution Avenue, NE, Albuquerque, NM 87110 (Apud, BLANCHARD et al., 1995).

E.9- Programa **COMODE**: Confiabilidade, Modelos de Ensaio. Este programa executa cálculos e gráficos de parâmetros característicos de confiabilidade, Manutenibilidade e disponibilidade de sistemas, através de registros históricos, utilizando como base de cálculo a expressão de Weibul.

Referencia: LUCHESI, Kátia et al. FEM-UNICAMP. Departamento de mecânica. Campinas, 1999.

ANEXO F – Recomendações para Espaços Requeridos, Painéis de Controle e Fixação de Componentes

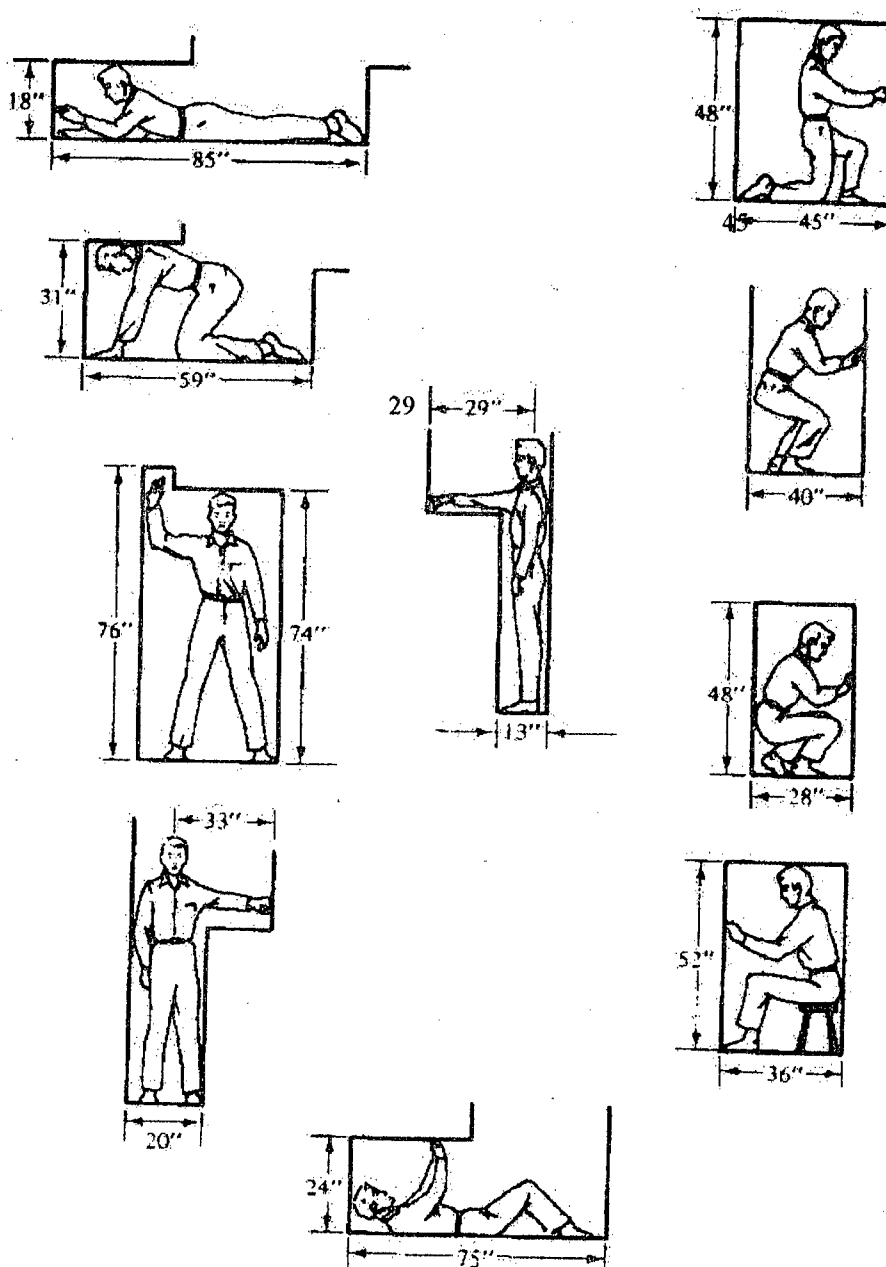


Fig. F. 1- Espaços requeridos para diferentes posições do corpo do trabalhador (Blanchard et al., 1995, p. 222).

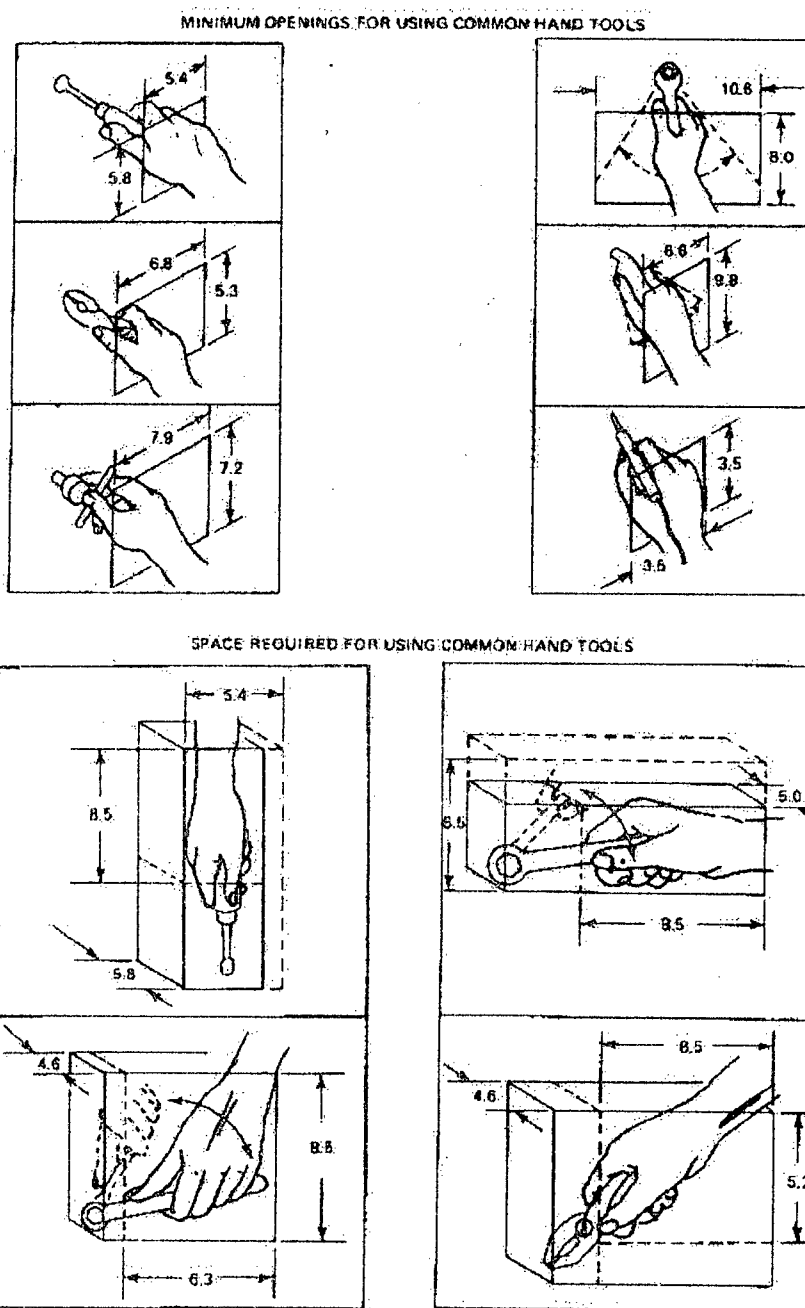


Fig. F. 2- Espaços requeridos para manipulação de ferramentas.
(Blanchard et al., 1995, p. 223).

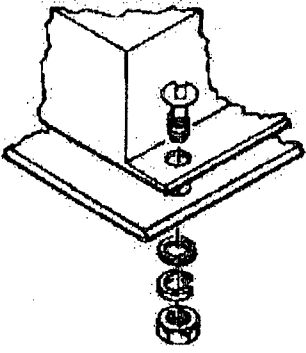
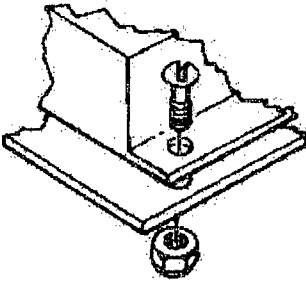
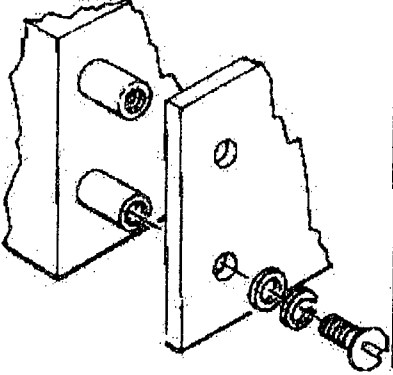
Mounting Method	Maintainability Considerations
	<p>Description: Horizontal surface mounted. Screws through clearance holes with nuts, flat washers, and lock washers.</p> <p>Advantages: No significant advantages.</p> <p>Disadvantages: Two-handed operation. Possible loss of nuts, washers, or screws. Alignment of holes difficult.</p> <p>Tools Required: Screwdriver and wrench or "spintite."</p> <p>Operating Time: Approximately 0.8 minute per fastener.</p>
	<p>Description: Horizontal surface mounted. Screws with stop nuts through clearance holes.</p> <p>Advantage: No washer required.</p> <p>Disadvantages: Stop nut difficult to turn. Two-handed operation. Alignment of holes difficult. Possible loss of nuts.</p> <p>Tools Required: Screwdriver and wrench or "spintite."</p> <p>Operating Time: Approximately 1.4 minutes per fastener.</p>
	<p>Description: Vertical surface mounted. Screws with flat washers and lock washers into tapped holes.</p> <p>Advantage: One-handed operation if part is supported.</p> <p>Disadvantages: Parts must be supported to start nuts or screws. Alignment of holes difficult. Possible loss of washers or screws.</p> <p>Tools Required: Screwdriver.</p> <p>Operating Time: Approximately 0.8 minute per fastener.</p>

Fig. F. 4- Comparação sobre métodos de montagem e fixação de componentes. (Blanchard et al., 1995, p. 225).

ANEXO G

Tabela de Fatores de Manutenibilidade para Cálculo do Tempo em Atividades de Manutenção Corretiva a serem utilizadas pela Expressão 2.9 (MIL-HDBK-472, 1984, p. A3-33-56)

Fatores da Variável A - Análise das características de manutenibilidade no projeto.	
Característica	Valor
A . 1 - Acesso (externo)	
1.1- Acesso visual e manipulação adequada, sem obstruções.	4
1.2- Acesso visual adequado, mas manipulação dificultada (cabos, tubulações, etc.).	2
1.3- Acesso e manipulação adequada, mas visão dificultada.	2
1.4- Acesso (visual e manipulação) não adequado.	0
A . 2 - Acesso (interno)	
2.1- Acesso visual e manipulação adequada, sem obstruções.	4
2.2- Acesso visual adequado, mas manipulação dificultada (cabos, tubulações, etc.).	2
2.3- Acesso e manipulação adequada, mas visão dificultada.	2
2.4- Acesso (visual e manipulação) não adequado.	0
A . 3 - Fixação (externa)	
3.1- Fixadores não necessitam de ferramentas especiais, exigem apenas uma parte de uma volta para a soltura e são cativos.	4
3.2-Fixadores atendem dois dos três quesitos mencionados anteriormente.	2
3.3- Fixadores atendem a um ou nenhum dos quesitos mencionados anteriormente.	0
A . 4 - Fixação (interna)	
4.1-Fixadores não necessitam de ferramentas especiais, exigem apenas uma parte de uma volta	4
4.2-Fixadores atendem dois dos três quesitos mencionados anteriormente.	2
4.3-Fixadores atendem a um ou nenhum dos quesitos mencionados anteriormente.	0

A . 5 - Tempo de acesso	
5.1- Acesso aos componentes em até um minuto, sem desmontagem prévia.	4
5.2- Pouca desmontagem necessária (acesso em até três minutos).	2
5.2- Tempo necessário considerável para desmontagem prévia (acesso acima de três minutos).	0
A . 6 - Facilidade de substituição	
6.1- Peças presas por engate ou tomadas, necessitando apenas de um puxão.	4
6.2- Peças presas por tomadas fixadas através de grampos, dispositivos contra soltura por vibração, conectores, etc.	2
6.3- Peças soldadas por solda fraca.	2
6.4- Peças soldadas e fixadas simultaneamente.	0
A . 7 - Segurança pessoal	
7.1- Nenhuma precaução necessária.	4
7.2- Alguma demora devido a algumas precauções.	2
7.3- Precauções especiais necessárias, consumindo tempo considerável.	0
A . 8 - Informações visuais	
8.1- Informação visual local, suficiente para diagnose e reparo na área..	4
8.2- Duas áreas devem ser consultadas para atuar na área.	2
8.3- Mas de duas áreas devem ser observadas para obter informação suficiente.	0
A . 9 - Indicadores de operação e de falhas	
9.1- Informação sobre falha por meio de indicadores ou alarmes.	4
9.2- Informação disponível através de dispositivos, mas necessita de interpretação ou teste adicionais.	2
9.3- Informação pode ser obtida através de equipamento de testes ou pode ser deduzida pelo comportamento do equipamento.	0
A . 10 - Disponibilidade de pontos de teste	
10.1- Não há necessidade de pontos de teste por existirem sistemas de testes integrados	4

10.2- Pontos suficientes para todos os testes de diagnoses.	3
10.3- 50% de pontos de testes disponíveis para diagnoses.	2
10.4- Pontos de testes não previstos.	0
A . 11 - Identificação de pontos de teste	
11.1- Todos os pontos de teste identificados.	4
11.2- Acima de 50% dos pontos de testes identificados.	2
11.3- Pontos de testes não identificados.	0
A . 12 - Identificação de componentes	
12.1- Todas as peças demarcadas de forma inequívoca.	4
12.2- Todas as peças demarcadas, mas algumas sem visibilidade.	2
12.3- Todas as informações visíveis, mas alguns elementos não identificados.	2
12.4- Algumas peças não visíveis e algumas não identificadas.	0
A . 13 - Ajustes	
13.1- Não há necessidades de ajustes.	4
13.2- Alguns poucos ajustes e realinhamentos necessários durante a inspeção.	2
13.3- Muitos ajustes e realinhamentos necessários durante a inspeção.	0
A . 14 - Testes de diagnose	
14.1- Elementos suspeitos podem ser testados sem remoção.	4
14.2- Testes exigem remoção dos elementos.	0
A . 15 - Dispositivos de proteção	
15.1- Sistemas automáticos desligam o equipamento em caso de falha.	4
15.2- Indicadores alertam sobre falha.	2
15.3- Nenhuma proteção ou aviso sobre falha foram providenciados.	0

Fatores da variável B - Facilidade da operação da manutenção	
B . 1 - Equipamentos externo de teste	
1.1- Equipamento externo de testes não necessários.	4
1.2- Um aparelho necessário.	2
1.3- Dois ou três aparelhos necessários.	1
1.4- Quatro ou mais aparelhos necessários.	0
B . 2 - Conexões para aparelhos de uso externo	
2.1- Conexão para aparelhos de teste desnecessários.	4
2.2- Conexão requer até dois adaptadores, dispositivos ou ferramentas.	2
2.3- Conexão requer mais do que dois adaptadores, dispositivos ou ferramentas.	0
B . 3 - Equipamentos de manutenção	
3.1- Manutenção pode ser feita manualmente com ferramentas comuns, sem dispositivos de levantamento.	4
3.2- Não mais do que um dispositivo extra é necessário.	2
3.3- Dois ou mais dispositivos extras necessários.	0
B . 4 - Contato visual com pessoal	
4.1- Atividades de todos os membros da equipe visível a todos.	4
4.2- Em algumas ocasiões, um dos componentes do grupo fora de vista.	2
4.3- Um dos componentes da equipe esta fora do campo visual do grupo.	0
B . 5 - Assistência do pessoal de operação	
5.1- A tarefa não requer consulta junto ao operador.	4
5.2- Algum contato necessário para descrição de sintomas.	2
5.3- Necessárias más do que 5 minutos de consultas ao operador.	0

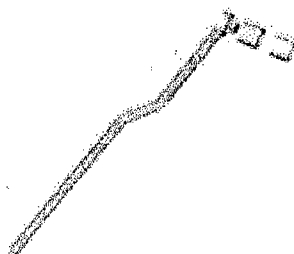
B . 6 - Pessoal técnico necessário	
6.1- Só um técnico necessário.	4
6.2- Dois técnicos necessários, pelo menos uma parte do tempo.	2
6.3- Mais do que dois técnicos necessários.	0
B . 7 - Assistência especializada	
7.1- Não há necessidade de consulta a supervisor ou representantes.	4
7.2- Alguma assistência necessária.	2
7.3- Necessária assistência considerável.	0

Fatores da variável C – Características mentais e físicas do trabalhador (Grão de esforço)	
Características	Valores de esforços atribuídos aos fatores
1- Grão de esforço atribuído a braços, pernas, costas.	<ul style="list-style-type: none"> - Mínimo: 4 - Abaixo de médio: 3 - Médio: 2 - Acima de médio: 1 - Máximo: 0
2- Duração e vigor de esforço em sustentação ou levantamento.	
3- Coordenação visão - mãos.	
4- Acuidade visual necessária.	
5- Análise lógica necessária para determinar origem de falha.	
6- Memória e idéias necessárias (Conhecimentos de equipamentos, sintomas, falhas, processos, etc.).	
7- Manejamento e capacidade de improvisação.	
8- Grau de cuidados e de exatidão (precisão).	
9- Perseverança e concentração.	
10- Iniciativa.	

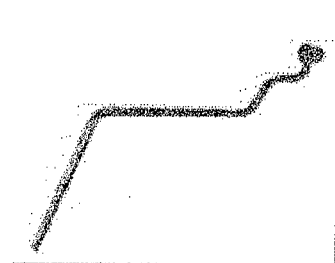
ANEXO H – Ferramentas Especiais para Facilitar o Acesso nas atividades de Soltura ou Aperto de Elementos de União



H.1

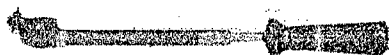


H.2

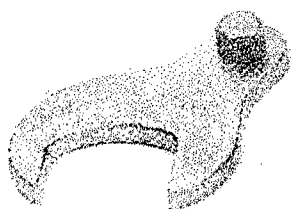
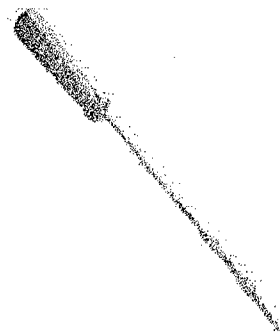


H.3

H.4



H.5



H.6



H.7

Fig. H.1- H.2 – H.3 – H.6 –H.7: Ferramentas de formatos especiais para parafusos/ porcas;

Fig. H.4: Chave de fenda de acionamento perpendicular;

Fig. H.5: Chave de fenda flexível.

(Fonte: Raven, 1999)

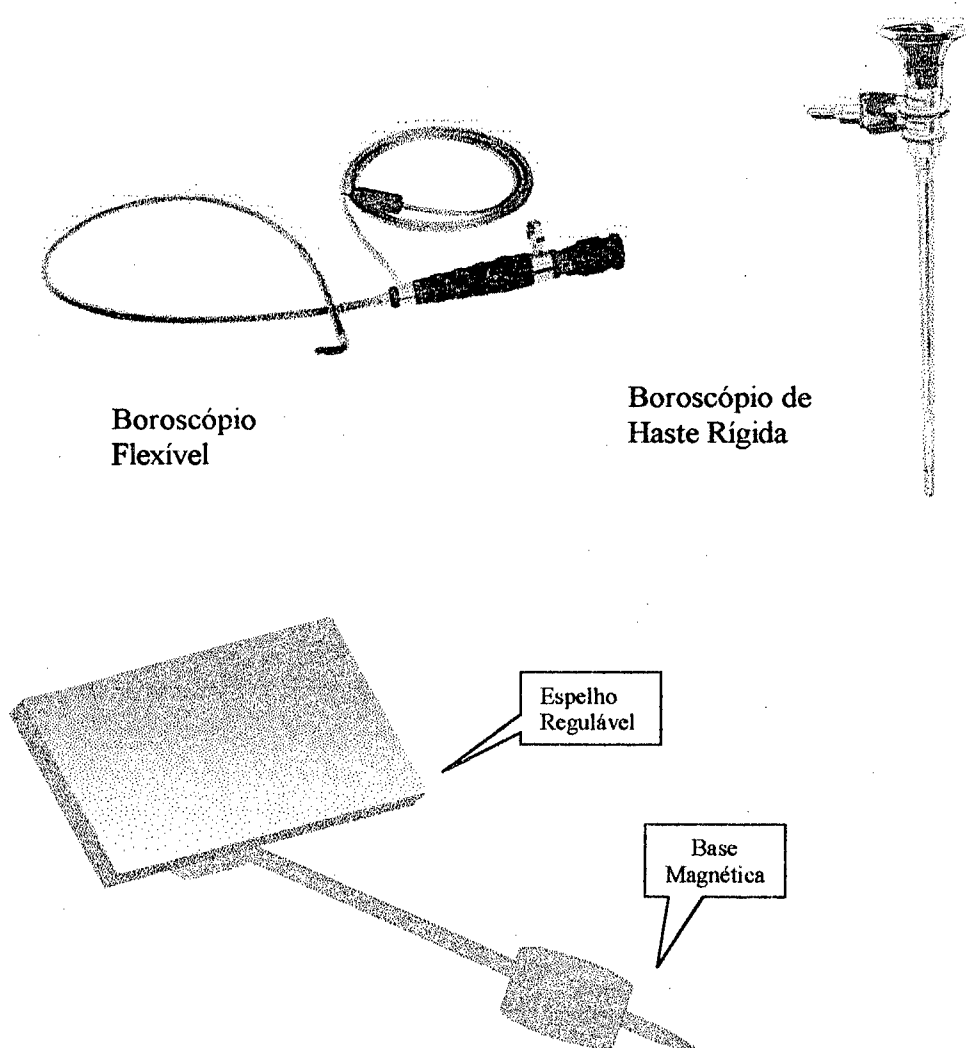


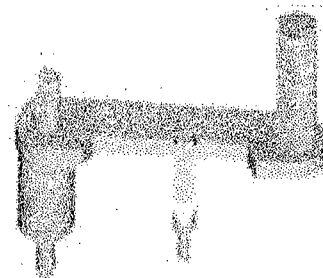
Fig. H.8- Ferramentas para facilitar a visualização



Extrator para rolamento
de bomba de água



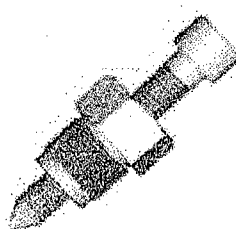
Extrator/ aplicador
para bucha de



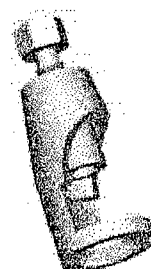
Ferramenta para
tensionar correias



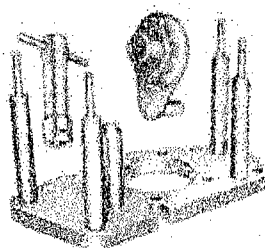
Ferramenta para
troca de correias



Extrator de
engrenagem



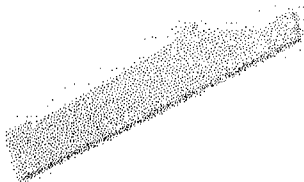
Extrator para barra
de direção



Ferramenta para regulagem de
garfos de caixa de transmissão

Fig. H.9- Ferramentas automotivas para facilitar a extração, remoção ou colocação de componentes (Fonte: Raven, 1999)

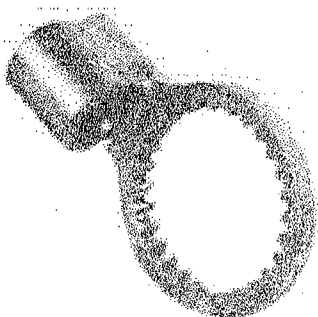
Dispositivo para Medição da
Profundidade do Pinhão de Diferencial



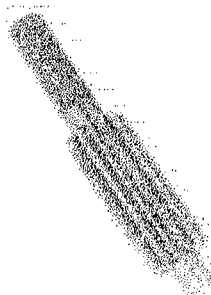
Dispositivo para Posicionamento de
Cabecotes



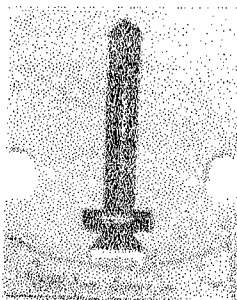
Ferramenta para Posicionar
Engrenagens do Diferencial



Guia para Centralizar Disco de
Embreagem



Goniômetro para Regulagem de
Cambagem



Guia Múltiplo para Caixa de
Transmissão

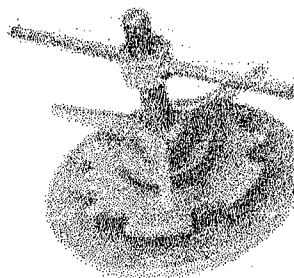
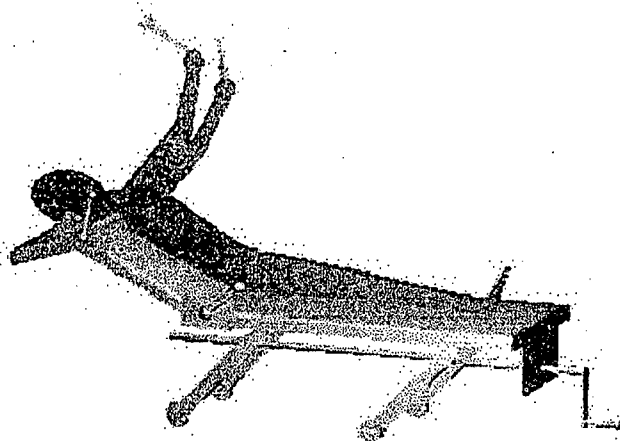


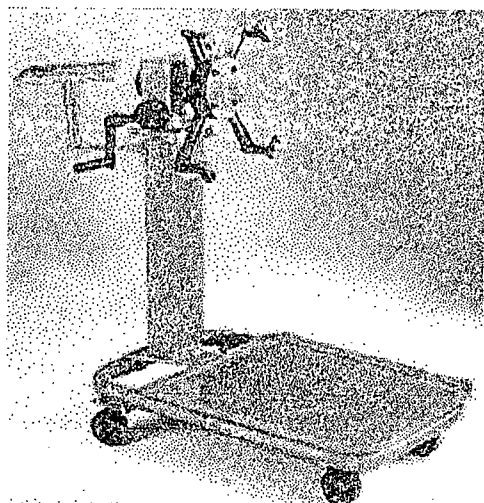
Fig. H.10- Ferramentas Automotivas para Facilitar o Posicionamento, Ajuste ou Calibração de Componentes (Fonte: Raven, 1999).



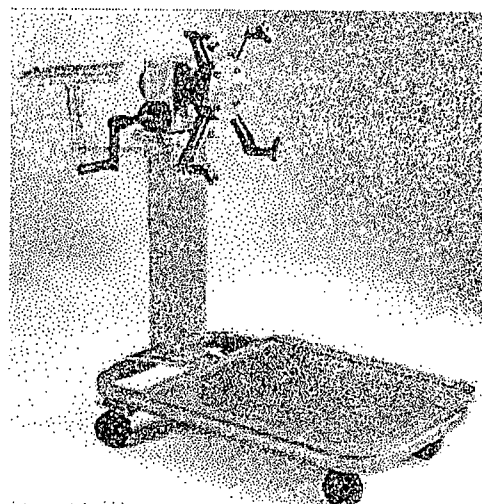
Plataforma para Posicionar e Apoiar o Corpo do Trabalhador em Serviços de Partes Inferiores com Acesso pela parte Superior (Alvarez, 2000)



Plataforma para Posicionar e Apoiar o Corpo do Trabalhador em Serviços de Partes Inferiores com Acesso pela parte Inferior (Alvarez, 2000)



Posicionador de Motores Automotivos



Posicionador de Caixas de Transmissão para Montagem no Veículo

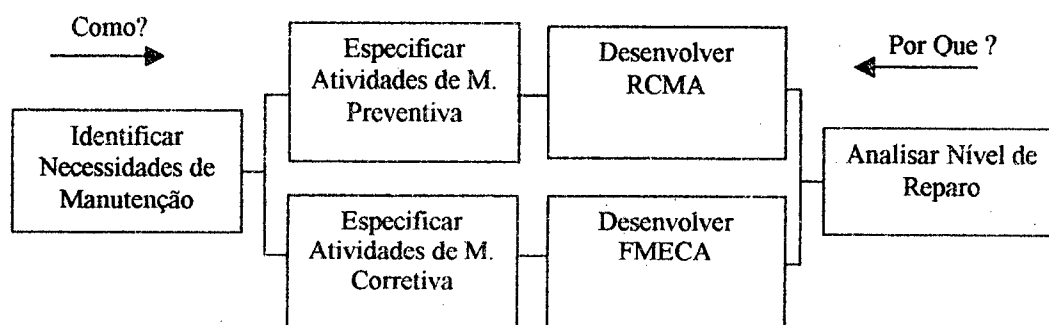
Fig. H.11- Posicionadores de Produtos/Sistemas no Plano de Trabalho do Trabalhador.

ANEXO I - Método para Análise Funcional de Processos – FAST

Este método (adaptado de CARTER, 1999), utiliza o diagrama de sequência funcional de processos similar ao diagrama de blocos mostrando e justificando a dependência lógica de cada função. Assim, o diagrama FAST - *Funcional Analysis and Sequencing Technique* (Análise Funcional e Sequência Técnica), esquematiza um diagrama em blocos com todas as funções de um determinado processo (incluindo objetivos, meios e fins), expressadas através de verbos e substantivos.

A partir deste diagrama assim representado, se questiona toda a sequência de blocos de esquerda para direita perguntando-se “Como?” cada função participa na consecução dos objetivos, meios e fins. E de direita para esquerda perguntando-se “Por Que ou Para Que?” a necessidade de cada função. Isto permite otimizar e pragmatizar cada função de um processo.

A figura a seguir, mostra um exemplo do processo de análise para determinar as necessidades ou requisitos de manutenção de produtos/sistemas.



O procedimento de análise segundo o exemplo da figura, na sequência de esquerda para direita seria;

Pergunta: Como determinar as necessidades de manutenção?

Resposta: Especificando atividades de manutenção preventiva.

Pergunta: Como especificar atividades de manutenção preventiva?

Resposta: Desenvolver RCMA.

Pergunta: Como desenvolver RCMA?

Resposta: Analisando o nível de reparo.

Os blocos inferiores também teriam o mesmo procedimento. Na sequência de direita para esquerda seria:

Pergunta: Para que analisar o nível de reparo?

Resposta: Para desenvolver RCMA.

Pergunta: Para que desenvolver RCMA?

Resposta: Para especificar as atividades de manutenção preventiva.

Pergunta: Para que especificar atividades de manutenção preventiva?

Resposta: Para determinar as necessidades de manutenção.

Os blocos inferiores também teriam o mesmo procedimento.

Neste procedimento de perguntas e respostas, pode acontecer que algum bloco de função seja questionado quanto necessidade ou função específica, neste caso acontecerá a otimização e/ou pragmatização do processo.

ANEXO J – Preenchimento da bateria de teste para verificar exigências a serem cumpridas pelos candidatos a indicadores de Manutenibilidade

Neste anexo preencheu-se a bateria de testes para verificar que todos os candidatos a indicadores de manutenibilidade cumpriram com as exigências segundo figura 4.4.

Quadro J.1: Exigências cumpridas pelo Indicador: Tipo de Fixação/ União

Essencial	Representa características das possíveis formas que podem apresentar os tipos de fixação/ união de elementos.
Controlável	Avalia unicamente o tipo de fixação/ união do elemento analisado.
Completo	Contém todos os aspectos relevantes que podem assumir os elementos de fixação/ união de componentes
Conciso	Permite avaliar de forma completa a característica assumida pelo tipo de fixação/ união.
Mensurável	Permite definir e especificar os vários níveis ou formas que pode assumir os elementos de fixação/ união.
Operacional	Relaciona os possíveis tipos de fixação/ união com suas possíveis conseqüências em termos de valor de referência.
Não redundantes	Não existe possibilidade de dupla avaliação dos aspectos analisados.
Inteligível	Permitir uma descrição clara para que diferentes pessoas possam associar ou interpretar o mesmo nível ordinal de escala com o tipo de fixação/ união analisada.

Quadro J.2: Exigências cumpridas pelo Indicador: Simplicidade Estrutural/ Funcional

Essencial	Representa as possíveis formas que se podem apresentar as características de Simplicidade Estrutural/ Funcional em componentes/ conjuntos/ sistemas.
Controlável	Avalia unicamente o tipo de Simplicidade Estrutural/ Funcional apresentado no item analisado.
Completo	Contém todos os aspectos relevantes que podem assumir os diferentes tipos de Simplicidade Estrutural/ Funcional
Conciso	Permite avaliar de forma completa as formas assumidas da Simplicidade Estrutural/ Funcional dos sistemas.
Mensurável	Permite definir e especificar os vários níveis ou formas que podem assumir a Simplicidade Estrutural/ Funcional.
Operacional	Relaciona as possíveis formas de Simplicidade Estrutural/ Funcional com suas conseqüências em termos de valor de referência.
Não redundantes	Não existe possibilidade de dupla avaliação dos aspectos analisados, ou seja, ser contemplado também por outro indicador.
Inteligível	Permitir uma descrição clara para que diferentes associem ou interpretem o mesmo nível ordinal de escala de um dado tipo de Simplicidade Estrutural/ Funcional analisado.

Quadro J.3: Exigências cumpridas pelo Indicador: Acessibilidade e Visibilidade

Essencial	Representa as possíveis formas que se podem apresentar as características de Acessibilidade e Visibilidade em componentes/ conjuntos/ sistemas.
Controlável	Avalia unicamente o tipo de Acessibilidade e Visibilidade apresentado no item analisado.
Completo	Contém todos os aspectos relevantes que podem assumir os diferentes tipos de Acessibilidade e Visibilidade.
Conciso	Permite avaliar de forma completa as formas assumidas da Acessibilidade e Visibilidade dos sistemas.
Mensurável	Permite definir e especificar os vários níveis ou formas que podem assumir a característica de Acessibilidade e Visibilidade de um item analisado.
Operacional	Relaciona as possíveis formas de Acessibilidade e Visibilidade com suas possíveis consequências em termos de valor de referência.
Não redundantes	Não existe possibilidade de dupla avaliação dos aspectos analisados, ou seja, ser contemplado também por outro indicador.
Inteligível	Permitir uma descrição clara para que diferentes pessoas associem ou interpretem o mesmo nível ordinal de escala de um dado tipo de Acessibilidade e Visibilidade analisado.

Quadro J.4: Exigências cumpridas pelo Indicador: Alcançabilidade e Manejabilidade

Essencial	Representa as possíveis formas que se podem apresentar as características de Alcançabilidade e Manejabilidade em componentes/ conjuntos/ sistemas
Controlável	Avalia unicamente o tipo de Alcançabilidade e Manejabilidade apresentado pelo item analisado.
Completo	Contém todos os aspectos relevantes que podem assumir os diferentes tipos de Alcançabilidade e Manejabilidade.
Conciso	Permite avaliar de forma completa as formas assumidas da Alcançabilidade e Manejabilidade nos sistemas.
Mensurável	Permite definir e especificar os vários níveis ou formas que podem assumir a Alcançabilidade e Manejabilidade de um item.
Operacional	Relaciona as possíveis formas assumidas pela Alcançabilidade e Manejabilidade de um item com as consequências em termos de valor de referência.
Não redundantes	Não existe possibilidade de dupla avaliação dos aspectos analisados, ou seja, ser contemplado também por outro indicador.
Inteligível	Permitir uma descrição clara para que diferentes pessoas possam associar ou interpretar o mesmo nível ordinal de escala de um dado tipo de Alcançabilidade e Manejabilidade analisado.

Quadro J.5: Exigências cumpridas pelo Indicador: Ajustagem e Calibragem

Essencial	Representa características das possíveis formas que podem apresentar a Ajustagem e Calibragem de componentes/ conjuntos/ sistemas.
Controlável	Avalia unicamente o tipo de Simplicidade Estrutural/ Funcional apresentado pelo item avaliado.
Completo	Contém todos os aspectos relevantes que podem assumir os diferentes tipos de Ajustagem e Calibragem.
Conciso	Permite avaliar de forma completa as formas assumidas pela Ajustagem e Calibragem dos sistemas.
Mensurável	Permite definir e especificar os vários níveis ou formas que podem assumir a Ajustagem e Calibragem de um item.
Operacional	Relaciona as possíveis formas de Ajustagem e Calibragem com as possíveis consequências em termos de valor de referência.
Não redundantes	Não existe possibilidade de dupla avaliação dos aspectos analisados, ou seja, ser contemplado também por outro indicador.
Inteligível	Permitir uma descrição clara para que diferentes pessoas possam associar ou interpretar o mesmo nível ordinal de escala dado a um tipo de Ajustagem e Calibragem analisado.

ANEXO K – Preenchimento das Matrizes para Obtenção das Escalas de Valor dos Indicadores de Manutenibilidade e Taxas de Substituição

Neste anexo, estão as matrizes de Macbeth, preenchidas para obtenção das escalas de valor dos indicadores de manutenibilidade do modelo e suas taxas de substituição. Os descritores dos indicadores de manutenibilidade estão ordenados de forma decrescente em função da atratividade apresentada por cada nível.

Estas matrizes são preenchidas com valores de 0 a 6 segundo escala de atratividade mostrada na Tabela K.1. (ver 3.4.3)

Tabela K.1- Categorias semânticas da escala de atratividade utilizada por *Macbeth*.

Escala de Atratividade		Valor
C0	Indiferença	0
C1	Muito fraca	1
C2	Fraca	2
C3	Moderada	3
C4	Forte	4
C5	Muito forte	5
C6	Extrema	6

Tabela K.2- Matriz de *Macbeth* e Resultado para o Indicador “Tipo de Fixação/ União”

I ₁ : Tipo de Fixação/ União	Nível Escalar	N5	N4	N3	N2	N1
Fixação com elementos passante, de aplique elástico ou de um giro, trava ou exentrico	N5	0	2	4	5	6
Fixação com um parafuso, luva de união ou elemento de varias voltas.	N4		0	3	4	5
Fixação com ate 3 parafusos ou elemento similar .	N3			0	3	5
Fixação com ate 6 parafusos ou elemento similar	N4				0	4
Fixação com mais de 6 parafusos ou elemento similar	N1					0
RESULTADO DA MATRIZ DE MACBETH						
	Nível Escalar	Escala de Macbeth	Valor Mínimo	Valor Máximo		
	N5	100	83,4	108,2		
	N4	83,3	79,2	91,5		
	N3	58,3	50,1	66,5		
	N2	33,3	29,2	41,5		
	N1	0	- 33,3	8,2		

Tabela K.3- Matriz de *Macbeth* e Resultado para o Indicador “Simplicidade Estrutural/ Funcional”

I₂: Simplicidade estrutural/ funcional	Nível Escalar	N5	N4	N3	N2	N1
Mecanismos convencionais de especialidade única sem dependência estrutural/funcional, pouca habilidade de mão de obra.	N5	0	1	3	4	6
Componentes com dependência estrutural e funcional e preponderância numa única especialidade, mão de obra com habilidade média.	N4		0	2	3	5
Grande número de componentes com dependência estrutural e funcional, preponderância numa única especialidade que exige habilidade normal e capacitação de mão de obra	N3			0	3	5
Mecanismos com dependência estrutural e funcional e varias especialidades, exige grande quantidade de informação, concentração, muita habilidade e capacitação.	N2				0	4
Mecanismos com dependência estrutural e funcional de varias especialidades, exige grande quantidade de informação, concentração e memorização, muita habilidade e capacitação. Uso de tecnologia inovadora, muitos recursos envolvidos e alta probabilidade de erro.	N1					0
RESULTADO DA MATRIZ DE MACBETH						
	Nível Escalar	Escala de Macbeth	Valor Mínimo	Valor Máximo		
	N5	100	91,8	108,3		
	N4	91,7	87,6	99,9		
	N3	75	70,9	83,3		
	N2	50	45,9	58,2		
	N1	0	-100	8,2		

Tabela K.4- Matriz de *Macbeth* e Resultado para o Indicador “I3 - Acessibilidade e Visibilidade”

I₃: Acessibilidade e visibilidade	Nível Escalar	N5	N4	N3	N2	N1
Totalmente Acessível e visível	N5	0	1	2	3	5
Totalmente Acessível porem não visível	N4		0	1	3	5
Totalmente visível porem não Acessível	N3			0	3	5
Acessibilidade e visibilidade comprometida, exige esforço para posicionamento físico do trabalhador	N2				0	4
Sem nenhuma acessibilidade e visibilidade, exige desmontagem previa.	N1					0
RESULTADO DA MATRIZ DE MACBETH						
	Nível Escalar	Escala de Macbeth	Valor Mínimo	Valor Máximo		
	N5	100	91	108,9		
	N4	90,9	81,9	99,9		
	N3	81,8	77,3	90,8		
	N2	54,5	50,1	63,5		
	N1	0	-100	8,9		

Tabela K.5- Matriz de *Macbeth* e Resultado para o Indicador “I4 - Alcançabilidade e Manejabilidade”

I4: Alcançabilidade e Manejabilidade	Nível Escalar	N5	N4	N3	N2	N1
Totalmente Alcançável e manejável	N5	0	2	3	5	6
Totalmente alcançável poreм não manejável	N4		0	3	5	6
Totalmente manejável poreм não alcançável	N3			0	4	6
Alcançabilidade e manejabilidade exige esforço para físico do trabalhador	N2				0	5
Sem nenhuma Alcançabilidade e manejabilidade, exige desmontagem previa	N1					0
RESULTADO DA MATRIZ DE MACBETH						
	Nível Escalar	Escala de Macbeth	Valor Mínimo	Valor Máximo		
	N5	100	89	105,4		
	N4	88,9	86,2	99,9		
	N3	72,2	69,5	77,7		
	N2	38,9	36,2	44,3		
	N1	0	-100	5,5		

Tabela K.6- Matriz de *Macbeth* e Resultado para o Indicador para o Indicador “I5 - Ajustagem e Calibragem”

I5: Ajustagem e Calibragem	Nível Escalar	N5	N4	N3	N2	N1
Não precisam de ajustagem e calibragem ou auto-ajustavel.	N5	0	3	4	5	6
Ajustagem com um tensor de rosca ou elemento e sem calibragem/ gabarito.	N4		0	2	4	5
Ajustagem com um tensor de rosca ou elemento e com calibragem/ gabarito.	N3			0	3	4
Ajustagem com mais de um tensor de rosca ou elemento e sem calibragem/ gabarito.	N2				0	3
Ajustagem com mais de um tensor de rosca ou elemento e com calibragem/ gabarito.	N1					0
RESULTADO DA MATRIZ DE MACBETH						
Nível Escalar		Escala de Macbeth		Valor Mínimo	Valor Máximo	
N5		100		91	118	
N4		72,7		63,7	77,2	
N3		54,5		50,1	63,6	
N2		27,3		18,3	36,2	
N1		0		- 18	9	

ANEXO L - Preenchimento das Matrizes para Verificar o Teste de Independência Preferencial Ordinal e Cardinal Mútua (Teste de Isolabilidade)

L.1- 1º. Matriz de verificação de Independência Preferencial Ordinal Mútua em Ordem Crescente de $i = 1$ até $i = n$

Ação a:	$I_1=100$ e $I_2=100$	$I_2=100$ e $I_3=100$	$I_3=100$ e $I_4=100$	$I_4=100$ e $I_5=100$	Ação a preferível da Ação a' (a P a')
Ação a':	$I_1=100$ e $I_2=0$	$I_2=100$ e $I_3=0$	$I_3=100$ e $I_4=0$	$I_4=100$ e $I_5=0$	
Ação b:	$I_1=0$ e $I_2=100$	$I_2=0$ e $I_3=100$	$I_3=0$ e $I_4=100$	$I_4=0$ e $I_5=100$	Ação b preferível da Ação b' (b P b')
Ação b':	$I_1=0$ e $I_2=0$	$I_2=0$ e $I_3=0$	$I_3=0$ e $I_4=0$	$I_4=0$ e $I_5=0$	

L.2- 2ª. Matriz de verificação de Independência Preferencial Ordinal Mútua em Ordem decrescente de $i = n$ até $i = 1$

Ação A:	$I_5=100$ e $I_4=100$	$I_4=100$ e $I_3=100$	$I_3=100$ e $I_2=100$	$I_2=100$ e $I_1=100$	Ação A preferível da Ação A' (A P A')
Ação A':	$I_5=100$ e $I_4=0$	$I_4=100$ e $I_3=0$	$I_3=100$ e $I_2=0$	$I_2=100$ e $I_1=0$	
Ação B:	$I_5=0$ e $I_4=100$	$I_4=0$ e $I_3=100$	$I_3=0$ e $I_2=100$	$I_2=0$ e $I_1=100$	Ação B preferível da Ação B' (B P B')
Ação B':	$I_5=0$ e $I_4=0$	$I_4=0$ e $I_3=0$	$I_3=0$ e $I_2=0$	$I_2=0$ e $I_1=0$	

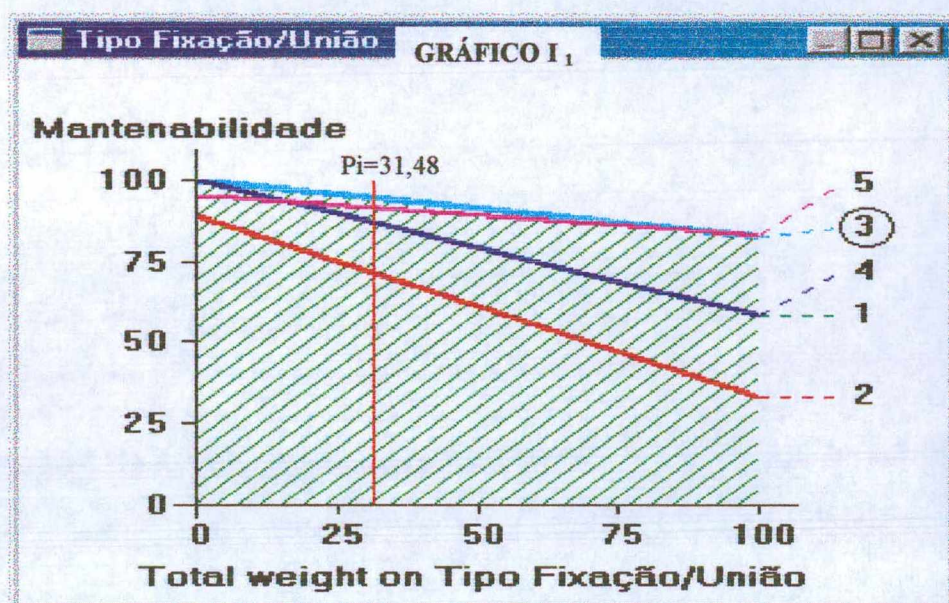
L.3- 3ª. Matriz de verificação de Independência Preferencial Cardinal na ordem crescente de $i = 1$ até $i = n$

Verifica se a Atratividade da ação $\Delta [I_i (NB) - I_i (NN)]$ é Independente de $I_{i+1} (NB)$ e $I_{i+1} (NN)$					
Ação a:	$\Delta [I_1=100 \text{ e } I_1=0]$	$\Delta [I_1=100 \text{ e } I_1=0]$	$\Delta [I_1=100 \text{ e } I_1=0]$	$\Delta [I_1=100 \text{ e } I_1=0]$	Ação a é Independente da Ação b e c
Ação b:	$I_2 = 100$	$I_3 = 100$	$I_4 = 100$	$I_5 = 100$	
Ação c:	$I_2 = 0$	$I_3 = 0$	$I_4 = 0$	$I_5 = 0$	
Ação a:		$\Delta [I_2=100 \text{ e } I_2=0]$	$\Delta [I_2=100 \text{ e } I_2=0]$	$\Delta [I_2=100 \text{ e } I_2=0]$	Ação a é Independente da Ação b e c
Ação b:		$I_3 = 100$	$I_4 = 100$	$I_5 = 100$	
Ação c:		$I_3 = 0$	$I_4 = 0$	$I_5 = 0$	
Ação a:			$\Delta [I_3=100 \text{ e } I_3=0]$	$\Delta [I_3=100 \text{ e } I_3=0]$	Ação a é Independente da Ação b e c
Ação b:			$I_4 = 100$	$I_5 = 100$	
Ação c:			$I_4 = 0$	$I_5 = 0$	
Ação a:				$\Delta [I_4=100 \text{ e } I_4=0]$	Ação a é Independente da Ação b e c
Ação b:				$I_5 = 100$	
Ação c:				$I_5 = 0$	

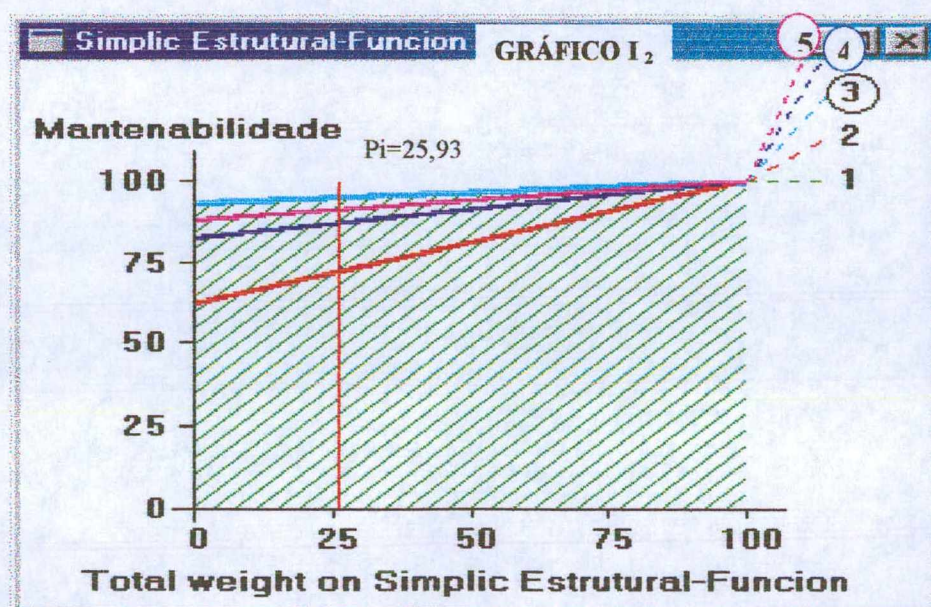
L.3 (continuação)- 3ª. Matriz de verificação de Independência Preferencial Cardinal na ordem decrescente de $i = n$ até $i=1$

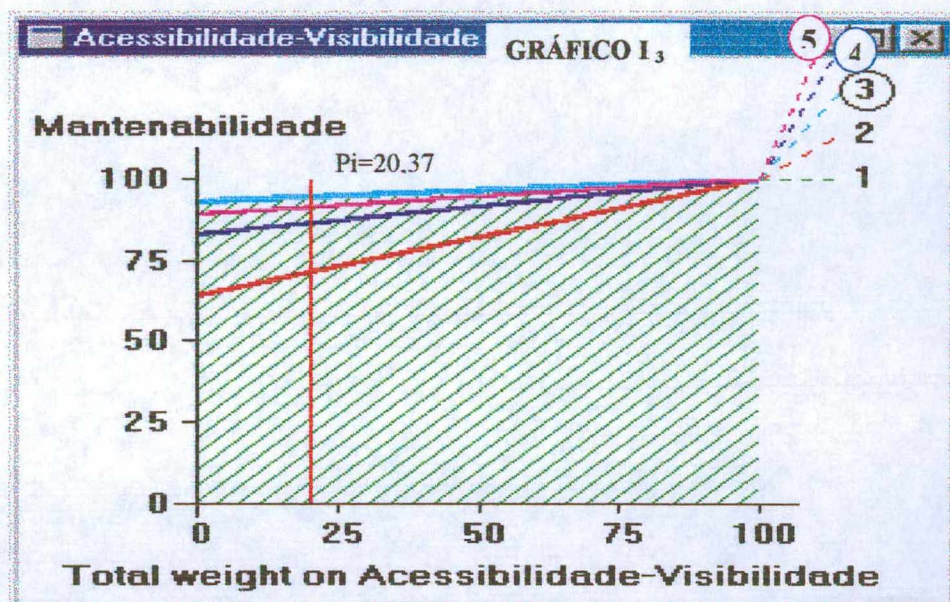
Verifica se a Atratividade da ação $\Delta [In_{(NB)} - In_{(NN)}]$ é Independente de $In-1_{(NB)}$ e $In-1_{(NN)}$					
Ação A:	$\Delta[I_5=100 \text{ e } I_5=0]$	$\Delta[I_5=100 \text{ e } I_5=0]$	$\Delta[I_5=100 \text{ e } I_5=0]$	$\Delta[I_5=100 \text{ e } I_5=0]$	Ação A é Independente da Ação B e C
Ação B:	$I_4 = 100$	$I_3 = 100$	$I_2 = 100$	$I_1 = 100$	
Ação C:	$I_4 = 0$	$I_3 = 0$	$I_2 = 0$	$I_1 = 0$	
Ação A:		$\Delta[I_4=100 \text{ e } I_4=0]$	$\Delta[I_4=100 \text{ e } I_4=0]$	$\Delta[I_4=100 \text{ e } I_4=0]$	Ação A é Independente da Ação B e C
Ação B:		$I_3 = 100$	$I_2 = 100$	$I_1 = 100$	
Ação C:		$I_3 = 0$	$I_2 = 0$	$I_1 = 0$	
Ação A:			$\Delta[I_3=100 \text{ e } I_3=0]$	$\Delta[I_3=100 \text{ e } I_3=0]$	Ação A é Independente da Ação B e C
Ação B:			$I_2 = 100$	$I_1 = 100$	
Ação C:			$I_2 = 0$	$I_1 = 0$	
Ação A:				$\Delta[I_2=100 \text{ e } I_2=0]$	Ação A é Independente da Ação B e C
Ação B:				$I_1 = 100$	
Ação C:				$I_1 = 0$	

Estes gráficos são comentados no item 4.2.7.

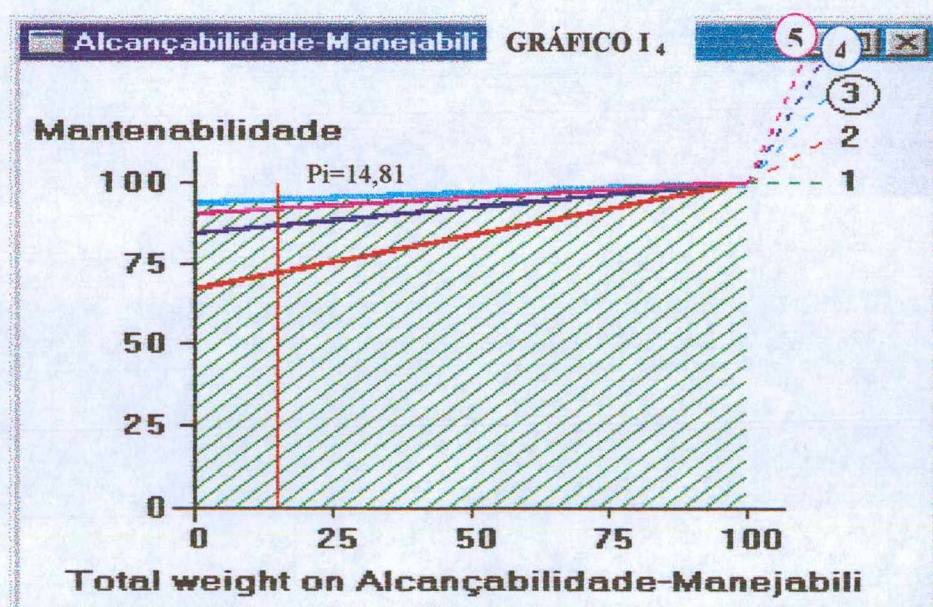


Sub-Blocos: 1 2 3 4 5

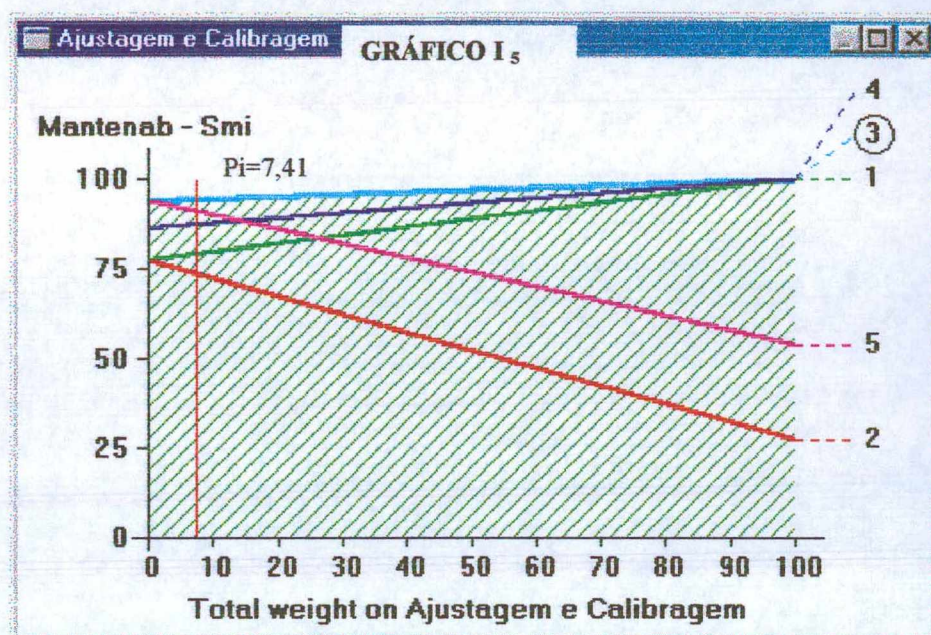




Sub-Blocos: ① — ② — ③ — ④ — ⑤



Sub-Blocos: ① — ② — ③ — ④ — ⑤



ANEXO N - Diferentes Formas de Ponderação da Frequência de Manutenção para obter o Índice e Manutenibilidade Global

Apresenta-se neste anexo uma abordagem das diferentes formas de cálculo que poderiam ser dadas ao Índice de Manutenibilidade Global (Img).

N.1- Cálculo pela média aritmética

A expressão N.1 calcula o índice de manutenibilidade global (Img) como média aritmética dos índices de manutenibilidade (Im) existentes em cada componente ou conjunto do sistema, não levando em consideração a frequência de intervenção de manutenção de cada componente durante a vida útil do mesmo.

$$Img = \sum_u^n \frac{Im_u}{N_c} \quad (N.1)$$

Onde: Im_u é o valor do índice de manutenibilidade local do item u ;

N_c é o número de itens/ componentes/ conjuntos avaliados no produto.

O cálculo do Img pela média aritmética que correlaciona o índice de manutenibilidade local com o número de componentes do sistema avaliado, não interessa para este trabalho. Assim, apresenta-se a seguir formulas de cálculo do Img que correlaciona o índice local (Im), o número de componentes (N_c) e frequência de manutenção (F) de forma ponderada. A forma desta ponderação, será abordada com diferentes alternativas matemáticas.

N.2- Cálculo do (Img) através da ponderação linear da frequência F

A expressão N.2 mostra a forma de cálculo do Img, correlacionado através da frequência F, ponderada de forma linear (ver figura N.1).

$$Img = \sum_u^n \frac{Im_u \cdot \{1 - [(F_u - 1) / K]\}}{N_c} \quad (N.2)$$

Onde: Im_u é o valor de manutenibilidade local do componente u ;

F_u é o valor da frequência de intervenções de manutenção no componente u ($F_u \geq 1$);

K é o coeficiente de variação linear ou pendente escolhido em função do maior valor de F_u exigido pela manutenção do sistema avaliado, onde: ($K \geq F_u$);

N_c é o número de componentes avaliados no produto.

N.3- Cálculo do (Img) através da frequência (F) com ponderação logarítmica em progressão crescente

A expressão N.3 avalia o Img correlacionado através da frequência (F) de manutenção, ponderado de forma logarítmica com progressão crescente (ver Figura N.1).

$$\text{Img} = \frac{\sum_u^n \text{Im}_u \cdot (\text{Log}_K(K+1-F_u))}{N_c} \quad (\text{N.3})$$

Onde: K é a base do logaritmo a ser utilizada, (K = 100);

F_u é o valor da frequência de intervenções de manutenção no componente u
(1 ≤ F_u ≤ K);

N_c é o número de componentes avaliados no produto.

N.4- Cálculo do (Img) correlacionado através da frequência (F) com ponderação logarítmica em progressão decrescente

A expressão N.4 avalia o Img correlacionado através da frequência (F) de manutenção, ponderado de forma logarítmica com progressão decrescente (ver Figura N.1).

$$\text{Img} = \frac{\sum_u^n \text{Im}_u \cdot (1 - \text{Log}_K F_u)}{N_c} \quad (\text{N.4})$$

Onde: K é a base do logaritmo a ser utilizada, (K = 100);

F_u é o valor da frequência de intervenções de manutenção no componente u
(1 ≤ F_u ≤ K);

N_c é o número de componentes avaliados no produto.

N.5- Cálculo do (Img) correlacionando a frequência (F) com ponderação pelo método *Macbeth*

A solução proposta para encontrar a forma de ponderação de (F) de uma maneira justificável é através da construção da função de valor desta ponderação, pelo método *Macbeth* segundo juízos de valor de decisóres (MCDA).

A expressão N.5 mostra esta forma, que também está representada na figura N.1.

$$\text{Img} = \frac{\sum_u^n \text{Im}_u \cdot M \cdot F_u}{N_c} \quad (\text{N.5})$$

Onde: M é o coeficiente da escala *Macbeth* para a taxa de ponderação da frequência de manutenção F_u (0 ≤ M ≤ 1);

F_u é o valor da frequência de intervenções de manutenção no componente u ($F_u \geq 1$);

N_c é o número de componentes avaliados no produto.

O cálculo do Img através desta expressão produz a correlação do F de forma justificada para todos os pontos da função, já que foram construídas emitindo-se juízo de valor em cima dos próprios pontos. Isto não acontece com as outras expressões (linear ou logarítmica), que são funções fixas, podendo justificar alguns de seus pontos, mas dificilmente todos. Por outro lado, a ponderação do F através das taxas obtidas pelo método *Macbeth*, poderá adquirir a forma de qualquer função, desde que seja contínua e com variação da taxa de ponderação de 0 a 1 (ver figura N.1).

As funções apresentadas para correlação do Img através da ponderação de F possuem as seguintes particularidades:

- a taxa de ponderação varia de 0 a 1, correspondendo o valor 1 para a frequência mínima ($F=1$), e o valor 0 para a frequência máxima ($F=100$), quando $K=100$;
- o maior valor de frequência que pode ser utilizado é $F=100$, por que as funções foram construídas para este limite de frequência. Esta limitação da frequência máxima foi estabelecida assumindo que produto/ sistemas mecânico tem vida útil física de 5 a 10 anos, e supondo o maior valor de vida útil (10 anos), a frequência $F=100$ determina uma atividade de manutenção a cada 1,2 meses, valor que extrapola qualquer expectativa de frequência de manutenção em sistemas modernos.

A figura N.1 mostra a tendência de variação das funções apresentadas para ponderação da frequência F na forma linear, logarítmica com progressão crescente/ decrescente e *Macbeth*.

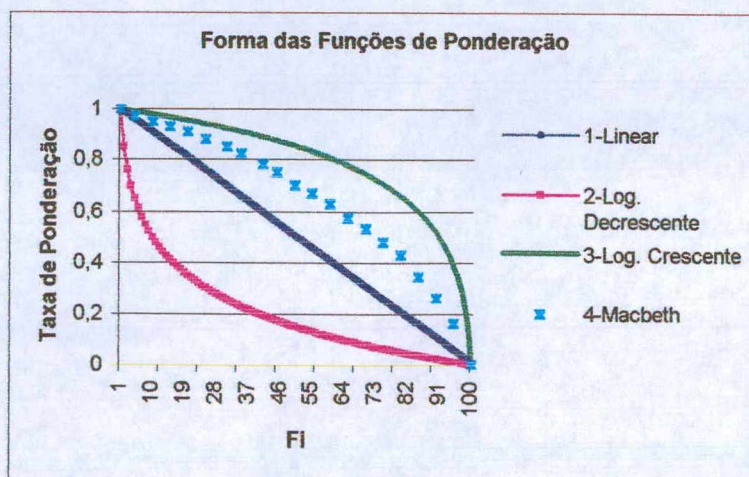


Fig. N.1- Tendências na variação das funções para cada tipo de ponderação da frequência F_i (linear, logarítmica, e Macbeth), obtidas no software EXCEL.

Da análise da figura N.1 podem-se realizar os seguintes comentários:

- o cálculo do I_{mg} com correlação linear apresenta variação constante na taxa de ponderação para todos os pontos da função (pendente constante), dando como resultado um índice global (I_{mg}) com correlação uniforme e proporcional a (F);
- o cálculo do I_{mg} com correlação logarítmica segundo progressão de escala crescente possui uma taxa de ponderação suave numa parte da função, desde $F = 1$ ate aproximadamente $F \approx 85$, que correlacionado com o índice local (I_m) fornece resultados do índice global (I_{mg}) menos diminuído nestes pontos. Esta ponderação é mais pronunciada (com crescimento logarítmico) na faixa do (F) desde aproximadamente $F \approx 85$ ate $F=100$, dando como resultado um índice global (I_{mg}) fortemente minimizado nestes pontos de frequências;
- o cálculo do I_{mg} com correlação logarítmica segundo progressão de escala decrescente provoca uma ponderação pronunciada no inicio da função com $F = 1$ ate aproximadamente $F \approx 15$, provocando uma correlação mais brusca, dando como resultado um índice global (I_{mg}) fortemente diminuído para estes pontos. Situação contraria acontece quando afetados pelas taxas de ponderação correspondentes a $F \approx 15$ ate $F=100$, que por ter decréscimo em escala logarítmica o resultado do índice global (I_{mg}) é menos minimizado nesta parte da função de ponderação;
- o cálculo do I_{mg} com correlação pela taxa obtida através de *Macbeth* apresenta uma forma de ponderação intermediaria entre a forma linear e logarítmica crescente, apresentando uma tendência mais uniforme na taxa de ponderação em quase todos os pontos da função. Assim a correlação com esta função de ponderação, determina resultados de índices globais (I_{mg}) uniforme, sem tendências de reforço ou diminuição em qualquer ponto de (F). Esta função também pode ser gerada através da extrapolação gráfica de pontos entre a forma linear e logarítmica.

Pela análise apresentada com as diferentes formas de ponderação do (F), pode-se justificar o motivo pela escolha da função logarítmica crescente (N.3), a ser utilizada pelo modelo no cálculo do Índice de Manutenibilidade Global (I_{mg}), segundo expressão (4.5) (Capítulo 4). Esta justificativa pode ser assim explicada:

Optou-se por incluir a frequência de manutenção (F) no cálculo do Img , para satisfazer a referência do Capítulo 2, que expressa a função da manutenibilidade como característica de projeto de produtos/ sistemas para: “facilitar as atividades de manutenção como também diminuir e/ou elimina-las se possível for”. Como o modelo deste trabalho pretende ser um instrumento de avaliação e análise da manutenibilidade, deve ser condicionado para que possa detectar indicadores de manutenibilidade fracos que dificultem a facilidade de manutenção, e frequências elevadas de manutenção (F), que aumentam as atividades através do número de repetições de manutenção ao longo da vida útil. Para satisfazer esta última condição, optou-se pela função que correlaciona a manutenibilidade com taxas de ponderação de forte redução para valores elevados de frequência (F_i próximos de 100), provocando uma diminuição acentuada no valor do índice de manutenibilidade global (Img). Esta diminuição no valor do índice obtido permite deduzir a presença de frequências elevadas, que devam ser diminuídas para melhorar a manutenibilidade do produto/ sistema. Este comportamento de ponderação do (F_i) é cumprido satisfatoriamente pela função escolhida.

ANEXO O - Apresentação do Produto Utilizado para o Teste na Versão Original e Modificada

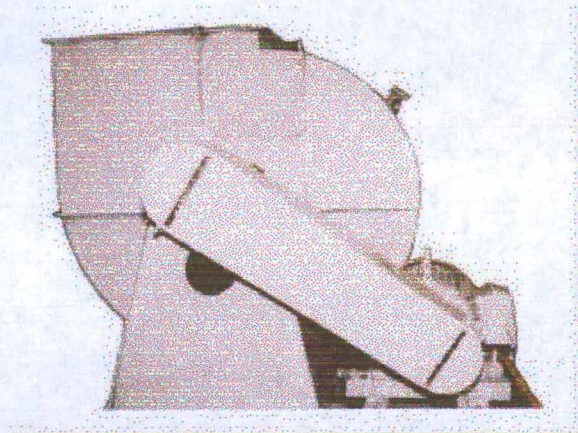


Fig. O.1- Vista geral do produto de teste na versão original

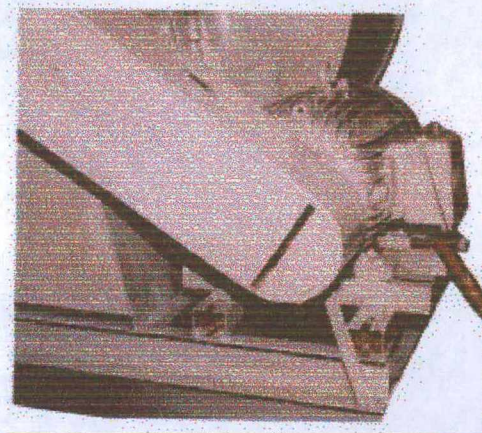


Fig. O.2- Vista do sistema de fixação e tensionamento da correia na versão original

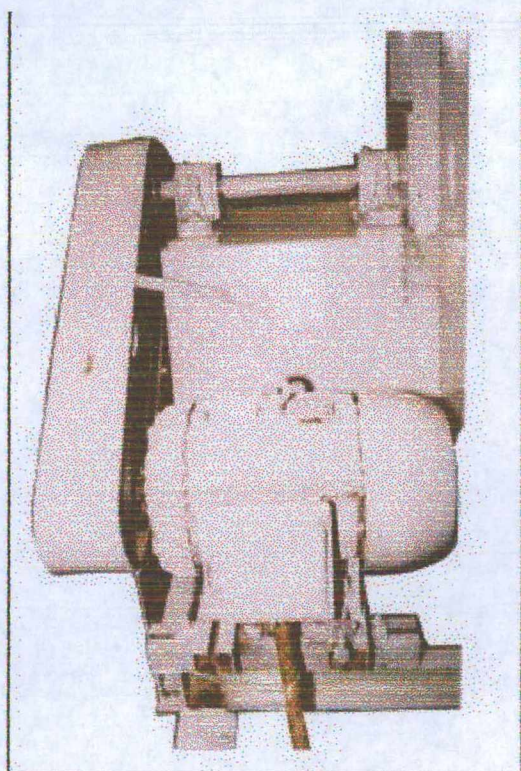


Fig. O.3- Vista dos mancais, proteção das correias e sistema de fixação e tensionamento da transmissão na versão original.

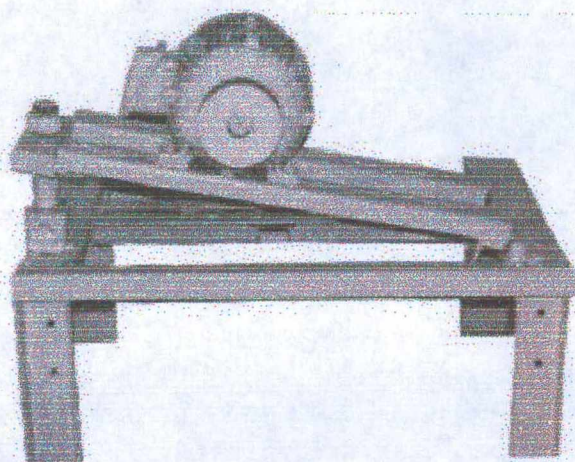


Fig. 0.4- Protótipo da melhoria de projeto no sistema de fixação e tensionamento da correia de transmissão - versão modificada.